



**LEOPOLDO UBERTO RIBEIRO JUNIOR**

**APRIMORAMENTO DE UM INSTRUMENTO DE GESTÃO PARA OPERAÇÃO DE  
RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS COM USOS MÚLTIPLOS SOB CONDIÇÕES DE  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS: estudo de caso UHE de Furnas**

**CAMPINAS - SP**

**2013**

**i**





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

LEOPOLDO UBERTO RIBEIRO JUNIOR

**APRIMORAMENTO DE UM INSTRUMENTO DE GESTÃO PARA OPERAÇÃO DE  
RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS COM USOS MÚLTIPLOS SOB CONDIÇÕES DE  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS: estudo de caso UHE de Furnas**

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Zuffo

Tese de doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos pré-requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos.

Este exemplar corresponde à versão final da Tese defendida pelo aluno Leopoldo Uberto Ribeiro Junior e orientado pelo Prof. Dr. Antonio Carlos Zuffo.

---

Prof. Dr. Antonio Carlos Zuffo.

CAMPINAS - SP

2013

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R354a Ribeiro Junior, Leopoldo Uberto, 1978-  
Aprimoramento de um instrumento de gestão para operação de reservatórios hidrelétricos com usos múltiplos sob condições de mudanças climáticas : estudo de caso UHE de Furnas / Leopoldo Uberto Ribeiro Junior. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Antonio Carlos Zuffo.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Mudanças climáticas. 2. Recursos hídricos. 3. Usinas Hidrelétricas - Furnas (MG). 4. Teste de hipótese não paramétrico. 5. Hidrologia. I. Zuffo, Antonio Carlos, 1963-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Improvement of a management instrument for operation of hydropower reservoirs with multiple uses under conditions of climate changes : case study Furnas hydropower plant

**Palavras-chave em inglês:**

Climate change

Water resources

Hydroelectric power plants - Furnas (MG)

Chance of nonparametric

Hydrology

**Área de concentração:** Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

**Titulação:** Doutor em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Antonio Carlos Zuffo [Orientador]

Sérgio Valdir Bajay

Benedito Cláudio da Silva

Afonso Henriques Moreira Santos

Luisa Fernanda Ribeiro Reis

**Data de defesa:** 18-11-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

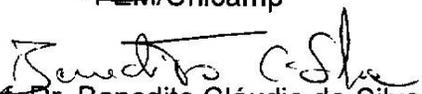
**APRIMORAMENTO DE UM INSTRUMENTO DE GESTÃO PARA  
OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS COM USOS  
MÚLTIPLOS SOB CONDIÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: Estudo de  
caso UHE de Furnas**

**Leopoldo Uberto Ribeiro Junior**

**Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

  
Prof. Dr. Antonio Carlos Zuffo  
Presidente e Orientador /FEC/Unicamp

  
Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay  
FEM/Unicamp

  
Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva  
UNIFEI

  
Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos  
UNIFEI

  
Profa. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis  
USP

Campinas, 18 de Novembro de 2013



## RESUMO

As pesquisas referentes às mudanças do clima são de extrema relevância para a sociedade; contudo, vêm resultando em divergências no meio científico e o tema necessita de mais estudos. Caso as projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que apontam para mudanças futuras do ambiente sejam verificadas, as consequências para as atividades humanas devem se manifestar de diversas formas. No Brasil, a hidroeletricidade é a principal fonte da matriz energética, e com a perspectiva de alterações do clima, os conflitos pelo uso da água nos reservatórios podem se acentuar. Dessa forma, analisa-se o possível impacto das mudanças climáticas sobre a Usina Hidrelétrica de Furnas e propõe-se uma abordagem metodológica para mitigação dos conflitos. Como o estudo do comportamento hídrico é fundamental para a eficiência do sistema de gestão, foi realizada análise de tendência temporal das variáveis precipitação e vazão, com base nos registros históricos por meio de sete testes não paramétricos. Diversos critérios restringiram a análise a 15% do total de postos pluviométricos na bacia, o que representa a deficiência do sistema de coleta, tratamento e gerenciamento dos dados, sendo que em 40% das estações avaliadas, as alterações foram significativas; contudo, as distribuições do número de dias chuvosos se mantiveram inalteradas. Em relação aos dados fluviométricos, foram identificadas tendências de aumento não significativas. Para estimativa da disponibilidade hídrica futura, foi utilizado o modelo hidrológico chuva-vazão MGB, que obteve bom ajuste e calibração em relação aos dados observados. A fim de alimentar o MGB, foram utilizados dados do modelo atmosférico global HadCM3; no entanto, o modelo possui limitações devido à alta resolução e custo computacional. Para contornar essa limitação, foi utilizada a técnica do "downscaling" para melhor representação dos processos físicos locais,

por meio do modelo regional Eta desenvolvido pelo INPE. Foram projetados cenários por meio de seis variáveis climatológicas de quatro membros, sendo o cenário "*medium*" o mais restritivo, dentro dos parâmetros do cenário A1B do IPCC, que foram bem ajustados para prever condições futuras, no período 2011 - 2099. Caso os cenários do Eta se verifiquem e a produção de energia de Furnas se mantenha próximo dos registros históricos, o reservatório pode esvaziar-se intensamente devido a uma estiagem prolongada. Assim, buscou-se o aprimoramento de uma metodologia para que os aproveitamentos hidrelétricos venham atender tanto a produção de energia como a necessidade da comunidade ribeirinha e de jusante. Com base nos dados históricos da operação, prosseguiu-se para fixação da duração e frequência de transgressão de referência, com base na cota 762 m, sendo determinado como condição ideal para um período de cinco anos que o reservatório deva ficar apenas dois ciclos distribuídos em 15 meses abaixo deste nível, que pode ser alcançado com adoção de uma regra operativa por meio do armazenamento de um percentual da vazão afluente planejada para o mês subsequente, sempre que as condições de frequência e duração não sejam atingidas. Como resultado, verifica-se a possibilidade de uso integrado mais eficiente, embora o efeito sobre o Sistema Interligado Nacional não tenha sido analisado.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Recursos Hídricos. Usinas Hidrelétricas - Furnas (MG).  
Teste de hipótese não paramétrico. Hidrologia.

## ABSTRACT

The research related to climate change are very important to society; however, has resulted in differences in the scientific community and the topic requires further studies. If the projections of the Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC that point for future changes in the environment, the consequences for human activities should manifest itself in many way. In Brazil, hydroelectric power is the greatest of the energy matrix, and with the possibility of climate change conflicts related to the water use in the reservoirs can be accentuated. In This way, were analyzes the potential impact of climate change on Furnas Hydroelectric Power and proposes a methodology to mitigation the conflicts. As the hydrology study is critical to the efficiency of the water management system, analysis trends of precipitation and flow variables, based on historical records using seven non-parametric tests. Some criteria analysis restricted to 15% of all pluviometer in the Furnas basin, which represents the deficiency in the collection, treatment and data management system, and in 40% of the stations evaluated the changes were significant, however the distributions of the number of rainy days remained without changed. In relation to runoff data, trends were identified no significant increase. To estimate future water availability, was used a hydrological rain-flow model - MGB, which got good adjustment and calibration to the observed data. In order to use the MGB, were used data from HadCM3 global atmospheric model; however, the model has limitations due to the high resolution and computational cost. To work around this limitation, it was used the technique of "downscaling" for better representation of local physical processes, through the regional model Eta developed by INPE. Scenarios were projected through six climatological variables of four members, the "medium" scenario show the most restrictive, within the parameters of the IPCC A1B scenario, which were

well adjusted to predict future conditions in the period 2011 - 2099. If the Eta scenarios occur, and the energy production of Furnas remains similar to historical records, the reservoir may empty intensely due to a prolonged drought. Thus, to improve the hydroelectric plants system will be proposed a methodology to consider energy production, such as the need of the riverside community and downstream public. Based on historical data of the operation, was fixed the duration and frequency of transgression of reference, based on 762 m level, being determined as optimal ideal condition for a period of five years that the reservoir should stay only two cycles distributed in 15 months under this level, which the adoption of an operation rule by storing a percentage of the influent flow planned for the following month, whenever the conditions of frequency and duration are not affected. As a result, there is the possibility of integrated use more efficient, although the effect on National Interconnected System has not been analyzed.

Keywords: Climate change. Water Resources. Hydroelectric power plants – Furnas (MG).  
Chance of nonparametric. Hydrology.

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1	Contexto.....	1
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Hipótese do trabalho .....	5
1.4	Estrutura do trabalho.....	6
2	Revisão bibliográfica .....	9
2.1	Mudanças climáticas.....	9
2.1.1	Evidências de mudanças no clima.....	15
2.1.2	Cenários climáticos do IPCC .....	17
2.1.3	Efeitos das Mudanças Climáticas .....	21
2.1.4	Modelos de Circulação Geral (GCM).....	26
2.1.5	Modelos globais adotados pelo IPCC.....	30
2.1.5.1	O modelo global UKMO-HadCM3.....	32
2.1.5.2	Modelos Regionais - Modelo Eta .....	34
2.2	Metodologias para avaliação de tendências climáticas.....	38
2.3	Modelos Hidrológicos de Transformação Chuva-Vazão .....	48
2.4	Sistema Elétrico Brasileiro .....	52
2.4.1	Modelo de operação do SIN .....	54

2.4.2	Modelos de usos múltiplos.....	57
2.5	Conflitos pelo uso da água em reservatórios de hidrelétricas .....	60
3	Materiais e Métodos .....	65
3.1	Estudo de caso – Bacia de Furnas .....	65
3.2	Critérios para seleção dos dados hidroclimáticos .....	70
3.3	Métodos estatísticos para análise de tendência temporal dos dados climáticos.....	72
3.3.1	Teste de Mann-Kendall.....	72
3.3.2	Teste de Pettitt.....	74
3.3.3	Teste Run .....	75
3.3.4	Teste de Spearman .....	76
3.3.5	Flutuação anual .....	77
3.3.6	Média Móvel .....	78
3.3.7	Regressão Linear .....	80
3.4	Modelo de Grandes Bacias – MGB/IPH.....	81
3.4.1	Dados de entrada .....	82
3.4.1.1	Delimitação da região de estudo .....	82
3.4.1.2	Definição da precipitação nas células.....	84
3.4.1.3	Dados de Solo e de Uso e Ocupação.....	85
3.4.2	Utilização e calibração do modelo .....	87
3.5	Aplicação dos cenários climáticos do modelo Eta.....	88
3.5.1	Aplicação da técnica do <i>downscaling</i> .....	89
3.5.2	Determinação dos cenários .....	90
3.5.3	Ajuste e verificação para o período 1960-1990 .....	91
3.5.3.1	Correção dos erros de precipitação.....	91
3.5.3.2	Correção dos erros sistemáticos das demais variáveis climatológicas .....	94
3.5.3.1	Verificação dos cenários de vazão para os períodos futuros (2010-2100).....	95
3.6	Modelo de operação dos reservatórios .....	97
3.7	O Modelo .....	98
3.8	Aplicação do modelo.....	101
4	Resultado .....	105
4.1	Detecção de tendência dos dados pluviométricos e fluviométricos .....	105
4.1.1	Seleção dos postos pluviométricos.....	105
4.1.2	Análise das séries temporais de chuva .....	109

4.1.3	Seleção dos postos fluviométricos.....	116
4.1.4	Análise das séries temporais de vazão .....	119
4.2	Ajuste do Modelo MGB para a bacia de Furnas.....	123
4.2.1	Calibração do modelo .....	123
4.2.2	Resultados do modelo .....	126
4.3	Aplicação dos cenários climáticos do modelo Eta.....	129
4.4	Aplicação do modelo de operação proposto .....	134
4.4.1	Projeção de níveis do reservatório de Furnas .....	134
4.4.2	Utilização do modelo de frequência e duração .....	143
5	Conclusão e Recomendações.....	147
	Referências.....	153
	Apêndices .....	167
	Apêndice A – Flutuação Anual.....	168
	Apêndice B – Média Móvel .....	179
	Apêndice C – Pettitt .....	190
	Apêndice D – Regressão .....	201
	Apêndice E – Vazão defluente projetada para usina de Furnas: Simulação 3.....	212
	Apêndice F – Vazão defluente projetada para usina de Furnas: Simulação 4.....	215
	Anexos.....	219
	Anexo A – Histórico das cotas de Furnas .....	220
	Anexo B – Geração de Furnas (GWh) .....	222
	Anexo C – Aplicação do MGB.....	224
	Anexo D – Aplicação do modelo de frequência e duração .....	274



## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Leopoldo Uberto Ribeiro e Cecília Gonçalves Porto Ribeiro;

Leticia Rodrigues Ribeiro, minha filha e Kelly Rejane de Souza, namorada.



## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta tese em concomitância com as atividades profissionais foi um desafio que exigiu muita dedicação, abdicação de momentos de lazer, inúmeras horas de sono e ausência constante.

Deste modo, agradeço aos meus pais, irmãos, familiares, amigos, namorada e filha pela compreensão, paciência, colaboração e apoio.

Ao professor Paulo Sérgio Franco Barbosa, pelo convite para ingressar junto à UNICAMP.

Ao professor Abel Maia Genovez, pela orientação no início deste trabalho.

Ao Daniel Garcia de Oliveira, Leandro da Silva Carneiro e Thiago Balisa Santana, peças fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Afonso Henriques, Carlos de Mathias Martins, Marco Aurélio e Robert Klein que souberam compreender a importância do desenvolvimento deste trabalho juntamente com os trabalhos na empresa.

Ao Marcio Antônio Severi, pelos incentivos de sempre.

Ao professor e amigo Afonso Henriques Moreira Santos, agradeço novamente pela ajuda, estímulo e “cobrança” desde os primórdios deste trabalho.

Ao professor Benedito Cláudio da Silva, pelo amparo e imensa ajuda no desenvolvimento das simulações.

Ao orientador Antonio Carlos Zuffo, meu eterno agradecimento pela contribuição, amizade, paciência e por aceitar o desafio de me orientar.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis inseridos).....	11
Figura 2.2: Gráfico de aquecimento global, publicado pelo jornal " <i>The Daily Mail</i> " de Londres.....	12
Figura 2.3: Mudanças globais de temperaturas - <i>Met Office</i> 'HadCRUT4'.....	13
Figura 2.4: Representação esquemática da família do cenário SRES. ....	19
Figura 2.5: Cenários de emissões de gases de efeito estufa utilizados pelo IPCC e consequente aumento da temperatura média.....	20
Figura 2.6: Esboço da discretização espacial dos modelos globais, grade sobre a Grã-Bretanha.....	27
Figura 2.7: Interações entre atmosfera, oceanos e continentes, representadas pelos modelos globais. ....	28
Figura 2.8: Representação da topografia por um modelo global com grade de 200 km, comparada com a topografia real observada no Oeste dos EUA.....	29
Figura 2.9: Evolução do aumento da complexidade dos modelos climáticos globais. ....	31
Figura 2.10: Exemplos de aplicações da técnica de " <i>downscaling</i> " de modelos globais para a Europa e norte da África.....	34
Figura 2.11: Simulações pelo modelo Eta para o cenário do IPCC AIB na América do Sul. ....	37
Figura 2.12: Diagrama da Integração Eletroenergética. ....	54
Figura 2.13: Interação entre os modelos hidrológicos e a cadeia de planejamento da operação do SIN.....	57
Figura 2.14: Reservatório de Furnas na cidade de Carmo do Rio Claro em dois momentos, vazio em 2001 e cheio em 2003. ....	62
Figura 3.1: Bacia do Rio Paraná e Bacia do Rio Grande.....	66

Figura 3.2: Delimitação da área de estudo. ....	67
Figura 3.3: Represa de Furnas antes e depois de sua implantação. ....	67
Figura 3.4: Geração média de energia na UHE de Furnas. ....	68
Figura 3.5: Municípios do Entorno de Furnas. ....	69
Figura 3.6: Cotas média mensal de Furnas no período de 1963 a 2011. ....	70
Figura 3.7: Resultados do teste de Pettitt para as diferentes séries de dados de precipitação. ....	75
Figura 3.8: Variação acumulada da precipitação para o município de Ibertioga. ....	78
Figura 3.9: Aplicação do conceito de janela móvel. ....	79
Figura 3.10: Precipitação total anual para o município de Monsenhor Paulo. ....	79
Figura 3.11: Distribuição da precipitação no município de Antônio Carlos. ....	81
Figura 3.12: Exemplo da rede de drenagem de alta resolução da parte sul da bacia hidrográfica. ....	83
Figura 3.13: Solos da bacia de Furnas. ....	85
Figura 3.14: Uso e ocupação do solo na bacia de Furnas (COLLISCHONN, 2007). ....	86
Figura 3.15: Procedimento de remoção de <i>bias</i> no período atual. ....	92
Figura 3.16: Procedimento de remoção de <i>bias</i> no período futuro. ....	93
Figura 3.17: Comparação da vazão média mensal observada (1961-1990) com as projeções do modelo Eta, para a sub-bacia de Furnas. ....	95
Figura 3.18: Vazões médias mensais para todos os períodos na sub-bacia de Furnas, sem os erros sistemáticos. ....	96
Figura 3.19: Evolução da capacidade instalada hidrotérmica do SIN (MW). ....	97
Figura 3.20: Reservatório de Furnas entre 1998 e 2000. ....	100
Figura 3.21: Fluxograma sugerido para atendimento aos conceitos de frequência e duração. ....	104
Figura 4.1: Postos Pluviométricos da Bacia de Furnas. ....	106
Figura 4.2: Postos pluviométricos selecionados para análise de tendência. ....	107
Figura 4.3: Resultados do teste de Pettitt para o posto pluviométrico – 02143006. ....	110
Figura 4.4: Janela móvel aplicada ao posto 2145001. ....	112
Figura 4.5: Análise de Regressão para o município de Cristina. ....	113
Figura 4.6: Variação acumulada da precipitação para o município de Baependi. ....	114
Figura 4.7: Postos pluviométricos selecionados para estudo, identificados como tendo tendência de aumento dos registros de precipitação. ....	115
Figura 4.8: Número de dias com chuva no período de 1948 – 1998. ....	116

Figura 4.9: Postos fluviométricos da Bacia de Furnas. ....	117
Figura 4.10: Postos fluviométricos selecionados. ....	118
Figura 4.11: Teste de regressão linear para o município de Ibitiruna. ....	120
Figura 4.12: Janela Móvel para a série de vazões para a UHE de Furnas. ....	121
Figura 4.13: Teste de Flutuação aplicado à série de vazões da usina de Furnas. ....	121
Figura 4.14: Teste de Regressão Linear aplicado à série de vazões da usina de Furnas. ....	122
Figura 4.15: Imagens de alta e baixa resolução da topografia da bacia hidrográfica de Furnas, com seu traçado. ....	123
Figura 4.16: Sub-bacias definidas para a calibração do modelo. ....	125
Figura 4.17: Hidrogramas calculados e observados para bacia de Furnas. Comparação dos dados para o período de calibração (a) e comparação dos dados do período de validação (b). ....	128
Figura 4.18: Vazões observadas e dos quatro cenários do modelo Eta para o período entre 1961 e 1990. ....	130
Figura 4.19: Projeções de vazões para o período de 2011 – 2040. ....	131
Figura 4.20: Projeções de vazões para o período de 2041 – 2070. ....	132
Figura 4.21: Projeções de vazões para o período de 2071 – 2099. ....	133
Figura 4.22: Projeções de vazão utilizando o MGB, alimentado pelo modelo Eta, considerando os parâmetros do cenário A1B do IPCC. ....	134
Figura 4.23: Projeção da defluência de Furnas para o período 2012 – 2100, considerando como dado de entrada as vazões estimadas por meio dos parâmetros do cenário A1B do IPCC. ....	138
Figura 4.24: Projeção de vazão defluente de Furnas – Simulação 3. ....	141
Figura 4.25: Curva de permanência de níveis projetada para Furnas. ....	142



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Diferenças entre as vazões simuladas para o clima futuro com um aquecimento de 2°C em relação à vazão do clima presente na bacia do rio Liard, no Canadá.....	25
Tabela 2.2: Empreendimentos em Operação. ....	53
Tabela 2.3: Características dos modelos.....	55
Tabela 3.1: Comparação entre os modelos de frequência e duração.....	104
Tabela 4.1: Características dos postos pluviométricos selecionados. ....	108
Tabela 4.2: Resultados teste de Mann-Kendall. ....	109
Tabela 4.3: Resultados teste de Pettit. ....	110
Tabela 4.4: Aplicação do teste de Run. ....	111
Tabela 4.5: Aplicação do teste de Spearman. ....	112
Tabela 4.6: Características dos postos fluviométricos selecionados. ....	118
Tabela 4.7: Resultados estatísticos para os postos fluviométricos. ....	119
Tabela 4.8: Postos fluviométricos utilizados. ....	124
Tabela 4.9: Estações climatológicas dentro da bacia a montante da barragem de Furnas. ....	126
Tabela 4.10: Parâmetros para ajuste do MGB.....	127
Tabela 4.11: Permanência de vazões (m <sup>3</sup> /s). ....	128
Tabela 4.12: Projeção de permanência do nível do reservatório de Furnas, considerando a manutenção da geração média histórica.....	137
Tabela 4.13: Projeção de geração de energia de Furnas. ....	138
Tabela 4.14: Geração média + desvio padrão (GWh).....	139
Tabela 4.15: Projeção da permanência do nível do reservatório de Furnas, Simulação 2. ....	139

Tabela 4.16: Permanência da vazão média em cada período. ....	141
Tabela 4.17: Projeção de geração de energia para Furnas. ....	143
Tabela 4.18: Cotas do lago de Furnas entre 2007 e 2011. ....	144
Tabela 4.19: Projeção de níveis entre Novembro de 2013 e Outubro de 2018. ....	144
Tabela 4.20: Projeção de níveis entre Novembro de 2013 e Outubro de 2018. ....	145
Tabela 4.21: Projeção de geração de energia Simulação 4. ....	146

## LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional das Águas  
APS – Alta do Pacífico Sul  
ASUL – Associação dos Usuários do Lago de Furnas  
CBH – Comitê da Bacia Hidrográfica de Furnas  
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica  
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
CGM – Modelo Climático Global  
CMSE – Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico  
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
DN – Distribuição Normal  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
GCM – Modelo de Circulação Geral  
HadCM3 – *Hadley Centre Coupled Model Version 3*  
HIDROWEB – Sistema de Informações Geográficas  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas  
IPH – Instituto de Pesquisa Hidráulica

MAE – Mercado Atacadista de Energia  
MGB – Modelo de Grandes Bacias  
MME – Ministério de Minas e Energia  
NCEP – *National Center for Environmental Prediction*  
OMM – Organização Meteorológica Mundial  
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico  
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
RECE – Relatório Especial sobre Cenários de Emissões  
SEB – Setor Elétrico Brasileiro  
SIN – Sistema Interligado Nacional  
SMAP – *Soil Moisture Accounting Procedure*  
SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos  
SRA – Segundo Relatório de Avaliação  
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*  
TRA – Terceiro Relatório de Avaliação  
TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission*  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
UHE – Usina Hidrelétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Y = ax + b$  – Equação da reta em que  $a$  = coeficiente angular da reta, e  $b$  = coeficiente linear da reta

$Z_{1-\alpha/2}$  – Teste com determinado nível de significância

$\bar{Q}$  – Vazão média (m<sup>3</sup>/s)

$\overline{Q_{obs}}$  – Vazão média observada, em m<sup>3</sup>s

$\Delta H$  [m] – Diferença de altura entre o extremo mais alto e o mais baixo da célula

$\Delta V$  – Variação de volume

$C_B$  [dias] – Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo

$C_I$  – Parâmetro adimensional para calibração do escoamento subsuperficial

$CO_2$  – Dióxido de carbono

$c_p$  [MJ.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>] – Calor específico do ar úmido

$C_S$  – Parâmetro adimensional para calibração do escoamento superficial

$D_{BAS}$  [mm] – Escoamento subterrâneo ao longo do intervalo de tempo (drenagem muito lenta)

$D_{CAP}$  [mm] – Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo

$D_{INT}$  [mm] – Escoamento subsuperficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem lenta)

$DM_{CAP}$  [mm] – Máximo fluxo ascendente para o solo (parâmetro do modelo)

$D_{SUP}$  [mm] – Escoamento superficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem rápida)

$e$  [m.s<sup>-1</sup>] – Taxa de evaporação da água

$e_d$  [kPa] – Pressão do vapor

$e_s$  [kPa] – Pressão de saturação do vapor  
 $F_4$  – Coeficiente de ajuste da resistência superficial  
 $F_i$  [mm] – Parâmetro de lâmina máxima de interceptação  
 $G$  [MJ.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>] – Fluxo de energia para o solo  
 GWh – Giga Watt hora – unidade de produção de energia  
 $h_{med}$  – Altura média (m)  
 IAF – Índice de área foliar (adimensional)  
 $L$  [km] – Largura da célula  
 $N_D$  – Número de dias do período de recessão do hidrograma  
 NS – Nash-Sutcliffe  
 NSlog – Coeficiente logaritmo de NS  
 ° C – Grau Celsius  
 $P$  [mm] – Precipitação incidente  
 $Q_0$  – Vazão no início da recessão  
 $Q_5$  – Vazão com permanência de 5% de tempo  
 $Q_{95}$  – Vazão com permanência de 95% de tempo  
 $Q_{ai}$  – Vazão afluente no instante  $i$  (m<sup>3</sup>/s)  
 $Q_{BAS}$  [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] – Vazão de saída do reservatório subterrâneo  
 $Q_{calc}$  – Vazão calculada pelo método em determinado  $t$ , em m<sup>3</sup>/s  
 $Q_{di}$  – Vazão defluente no instante  $i$  (m<sup>3</sup>/s)  
 $Q_{INT}$  [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] – Vazão de saída do reservatório subsuperficial  
 $Q_{ND}$  – Vazão no final da recessão  
 $Q_{obs}$  – Vazão observada em postos fluviométricos em  $t$ , em m<sup>3</sup>/s  
 $Q_{SUP}$  [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] – Vazão de saída do reservatório superficial  
 $r_a$  [s.m<sup>-1</sup>] – Resistência aerodinâmica  
 $R_L$  [MJ.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>] – Radiação líquida na superfície  
 $r_s$  [s.m<sup>-1</sup>] – Resistência superficial da vegetação  
 $r_{su}$  [s.m<sup>-1</sup>] – Resistência superficial considerando a umidade do solo  
 $S_{IL}$  [mm] – Capacidade do reservatório de interceptação  
 $T$  [mm] – Evapotranspiração da água da camada de solo ao longo do intervalo de tempo  
 $T_{ind}$  [s] – Tempo de retardo característico da célula

$T_{KB}$  [s] – Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo  
 $T_{KI}$  [s] – Parâmetro de retardo do reservatório subsuperficial  
 $T_{KS}$  [s] – Parâmetro de retardo do reservatório superficial  
 $U_{t,T}$  – Estatística que verifica o número de vezes que um elemento da primeira amostra é maior que um elemento da segunda  
 $VA_0$  – Volume morto ( $m^3$ )  
 $VA_{Max}$  – Volume máximo ( $m^3$ )  
 $VA_{min}$  – Volume mínimo ( $m^3$ )  
 $VA_t$  – Volume regularizado ( $m^3$ )  
 $V_{BAS}$  [ $m^3$ ] – Volume no reservatório subterrâneo  
 $V_{INT}$  [ $m^3$ ] – Volume no reservatório subsuperficial  
 $V_{SUP}$  [ $m^3$ ] – Volume no reservatório superficial  
 $W$  [mm] – Armazenamento do solo  
 $W$  [mm] – Armazenamento na camada de solo ao início do intervalo de tempo  
 $W_1$  – Fator de penalização  
 $W_2$  [mm] – Armazenamento na camada de solo ao final do intervalo de tempo  
 $W_C$  [mm] – Limite de armazenamento para haver fluxo ascendente  
 $W_L$  [mm] – Armazenamento em que inicia o efeito sobre a resistência superficial  
 $Wm^2$  – Fator na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera  
 $W_{PM}$  [mm] – Armazenamento do solo no ponto de murcha  
 $X_i$  – Variável observada ao longo de uma serie temporal com intervalo constante  $i$   
 $X_j$  – Variável observada ao longo de uma serie temporal com intervalo constante  $j$   
 $X_t$  – Variável observada ao longo de uma serie temporal com intervalo constante  $t$   
 $Y_1$  – 1º valor da variável observada ao longo de uma serie temporal  
 $Y_t$  – Variável observada ao longo de uma serie temporal com intervalo constante  $t$   
 $\gamma$  [kPa.°C<sup>-1</sup>] – Constante psicrométrica  
 $\Delta$  [kPa.°C<sup>-1</sup>] – Taxa de variação da pressão de saturação do vapor  
 $\lambda$  [MJ.kg<sup>-1</sup>] – Calor latente de vaporização  
 $\rho_A$  [kg.m<sup>-3</sup>] – Massa específica do ar  
 $\rho_W$  [kg.m<sup>-3</sup>] – Massa específica da água



# 1 Introdução

## 1.1 Contexto

A água, utilizada para diversos fins, é um dos elementos essenciais à manutenção da vida na Terra, e todos os seres vivos dependem dela para sobreviver e garantir a permanência da espécie. Vale ressaltar que não só o aumento populacional e a aceleração da economia ampliam os usos múltiplos da água; o desenvolvimento cultural e principalmente o industrial fazem com que outras necessidades sejam incorporadas. Em alguns países, a visão religiosa da água é muito comum, resultando, em alguns casos, na utilização em massa de rios e lagos sagrados para diversas atividades de cunho religioso (TUNDISI, 2003).

Deste modo, para que se assegurem os usos múltiplos (indústria, transporte, manutenção da biota, irrigação, dessedentação de animais, consumo humano, entre outros), gerir os recursos hídricos é imprescindível e pode ser alcançado por meio de medidas estruturais (obras de infraestruturas) e não estruturais (planos diretores, leis, etc.) de maneira sustentável.

Entre os marcos legais que abordam a gestão da água está a lei federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como “Lei das Águas”, que dentre seus objetivos tem a finalidade de prevenir e defender contra eventos hidrológicos críticos, de origem natural ou decorrentes do uso. Entretanto,

administrar este recurso é um grande desafio, pois além de ser um elemento de muita relevância, existe um desequilíbrio entre disponibilidade e demanda, seja espacial ou temporal.

Além disso, a oferta hídrica está intimamente relacionada a fatores físicos, geográficos, ocupação e dentre outros fatores, às características climáticas. Sendo assim, qualquer mudança no regime de chuva tem potencial de interferir gravemente na disponibilidade hídrica, tanto superficial quanto subterrânea, sobretudo quando essas mudanças ocorrem em um curto espaço de tempo.

O comportamento do clima, devido à sua relevância, vem despertando, ao longo dos anos, inúmeras pesquisas por parte da comunidade científica, tanto que, em 1988, ocorreu o estabelecimento do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), por meio da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) para avaliar as mudanças climáticas ocorridas no planeta Terra.

No Brasil, algumas evidências de alterações do clima puderam ser diagnosticadas, com um aquecimento de cerca de 0,7 °C nos últimos cinquenta anos, valor mais alto que a melhor estimativa de aumento médio global que foi de 0,64 °C (IPCC, 2007a). Como possível consequência deste evento, Marengo et al. (2011a) cita que no período de 2005 – 2010 ocorreram duas grandes secas e uma das piores enchentes já vistas na Amazônia, sendo que houve um recorde no nível dos rios em Manaus em 2009, e no ano seguinte, uma baixa recorde.

Deste modo, mudanças no clima podem produzir impactos econômicos importantes no Brasil. Dentre esses, a geração de energia proveniente das usinas hidrelétricas, que é responsável por aproximadamente 14 % da matriz energética, pode vir a sofrer com o fornecimento de eletricidade na ocorrência de uma redução da precipitação, ou implicar na operação de térmicas que possuem custo de geração mais elevado, além do efeito poluidor maior.

Complementarmente, diante da necessidade da geração hidro, aliada aos possíveis cenários de alteração do clima, conflitos pelo uso da água podem se agravar no entorno de reservatórios.

Dentre os principais empreendimentos de geração hídrica, tem-se a UHE de Furnas, localizada no curso médio do rio Grande, no trecho denominado "Corredeiras das Furnas", construída no início da

década de 60, alagando terras agrícolas pastoris, principal fonte econômica da época, fazendo a população do entorno se adaptar às novas condições impostas, dando início ao desenvolvimento de outras atividades, principalmente o turismo.

Furnas possui extenso reservatório (quase metade da costa brasileira em perímetro, quando em nível máximo), de modo que a exposição a intensos e duradouros esvaziamentos representam instabilidade na sustentabilidade das atividades socioeconômicas, dependentes da lâmina hídrica. Esta insegurança culminou na organização dos usuários por uma cota mínima de operação do lago: 762 m.

Como pode ser verificado, um estudo mais aprofundado dos componentes hidrológicos, como a precipitação e a vazão, faz-se necessário para a redução do risco no gerenciamento da infraestrutura de energia, entre outros. Portanto, quanto maior for o conhecimento sobre as vazões, a antecedência da previsão e a sua precisão, menores serão as perdas e maior a eficiência de funcionamento das obras hidráulicas dos sistemas hídricos (IPH, 2006).

Como em toda atividade de planejamento na qual a estimativa do cenário futuro pode produzir melhores resultados, a condição ideal é obter a previsão da vazão para se fazer uma melhor projeção da operação de uma estrutura hidráulica. Essa avaliação, quando realizada para um cenário de longo prazo, é feita com meses de antecedência e normalmente é fundamentada em estatísticas sazonais, por meio de modelos estocásticos, que se baseiam no passado para prever o futuro.

Entretanto, esse tipo de previsão, feita corriqueiramente pelo diversos centros de previsão, não são adequadas para identificar padrões de alteração no clima, que pode ocorrer ao longo de algumas décadas, devido à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana. Desse modo, neste trabalho foram utilizados cenários de clima gerados por um modelo atmosférico adotado pelo IPCC, gerados pelo modelo global HadCM3 (*Hadley Centre Coupled Model, version 3*), do centro de meteorologia *Met Office* (UK). As projeções do modelo HadCM3 possuem resolução espacial de cerca de 300 km, o que o torna pouco adequado para escala de bacias hidrográficas.

Para resolver essa questão, os cenários do HadCM3 foram detalhados pelo CPTEC/INPE por meio da técnica de “*downscaling*” dinâmico, gerando projeções com resolução espacial de

40 km (CHOU et al., 2011). Os cenários são projeções de variáveis climáticas que abrangem o período de 2010 a 2100, além do período de verificação de 1960 a 1990, em intervalos de tempo de seis horas.

Para transformação dos cenários de variáveis climáticas em vazões, utiliza-se o modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (COLLISCHONN, 2001).

Esse é um modelo distribuído de forte base física, o qual realiza a transformação da chuva em vazão, considerando os principais processos da fase terrestre do ciclo hidrológico, como interceptação, evapotranspiração, infiltração, balanço de água no solo e escoamento na rede de drenagem.

Diante dos cenários de vazões para 2100, aprimorou-se um mecanismo para que se busque um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, visando à mitigação dos usos concorrentes na usina de Furnas.

Assim, neste trabalho foi formulada uma regra de operação que ponderou tanto os interesses de jusante como os de montante, por meio da fixação dos parâmetros de duração e frequência do nível do lago, para que fossem incorporadas restrições no rebaixamento do reservatório para cota 762 m, considerando também o fornecimento de energia pela adaptação da metodologia desenvolvida no trabalho de Ribeiro Junior (2004).

## 1.2 Objetivos

O objetivo neste trabalho foi aprimorar um instrumento para o gerenciamento do uso da água no reservatório de uma usina hidrelétrica de acumulação, considerando tanto os interesses locais que buscam maiores garantias para o desenvolvimento das atividades no entorno do lago, pelo fato de estarem susceptíveis a constantes e intensas oscilações de níveis, e a geração de energia que abrange um coletivo maior, mediante possíveis mudanças do clima.

Para o refinamento deste instrumento, foram projetadas vazões afluentes a Furnas, por meio de um modelo chuva-vazão - MGB, a partir de projeções das variáveis climáticas que abrangem o período de 2010 a 2100, realizadas pelo IPCC.

Para o desenvolvimento deste conteúdo, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- análise estatística do comportamento das variáveis climáticas do ciclo hidrológico, precipitação e vazão, na bacia de estudo;
- adaptação e calibração do modelo chuva-vazão;
- escolha, ajuste e verificação do modelo climático que melhor se enquadre à região de estudo;
- aplicação dos cenários de mudanças climáticas gerados pelo modelo global ao modelo chuva-vazão e obtenção de séries de vazões afluentes da usina de Furnas para o período de 2010-2100;
- aprimorar o modelo de operação de usinas hidrelétricas desenvolvido por Ribeiro Junior (2004) que considera além da questão energética, usos múltiplos da água, por meio do conceito de frequência e duração de níveis;
- projetar o nível de água no lago da usina de Furnas mediante cenários de atendimento de demanda de energia e mediação de interesse pelo uso da água;
- aplicação dos conceitos de frequência e duração, visando minimizar conflitos entre setores usuários pelo uso da água.

### 1.3 Hipótese do trabalho

É possível mitigar conflitos pelo uso da água no entorno de reservatórios hidrelétricos, considerando os efeitos das mudanças do clima projetadas pelo IPCC, por meio de uma ferramenta que incorpore usos múltiplos da água através da determinação da frequência e duração de níveis.

## 1.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão da literatura sobre o tema. Para contextualizar as pesquisas referentes a mudanças climáticas, o texto apresenta estudos e pesquisas que corroboram com o assunto, assim com as correntes que apontam não haver embasamento científico para tal ceticismo. São apresentados os principais modelos empregados pelo IPCC bem como as principais metodologias (análise estatísticas) para avaliação de tendências climáticas. Ainda neste capítulo, apresenta-se o modelo hidrológico desenvolvido no trabalho, uma abordagem sobre o sistema elétrico brasileiro e a apresentação de conflitos pelo uso da água em reservatórios de hidrelétricas. Essa etapa discute e analisa os trabalhos e diversos pontos de vista sobre os assuntos abordados, de modo a embasar o desenvolvimento desta tese, suas premissas, contribuições e restrições.

O terceiro capítulo dedica-se aos métodos adotados, procedimentos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa e caracterização da região de estudo: bacia de Furnas. Deste modo, são apresentados os critérios para seleção dos dados climatológicos bem como os métodos estatísticos para análise de tendência temporal. Complementa esta parte, o processo para modelagem hidrológica da bacia, por meio do MGB-IPH, e a aplicação dos cenários climáticos do modelo Eta. Por fim, apresenta-se um modelo de operação de reservatórios, baseado no conceito de frequência e duração de níveis, para mediar usos múltiplos da água.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos oriundos da aplicação dos métodos apresentados. Deste modo, exibem-se os postos pluviométricos e fluviométricos selecionados bem como a análise estatística destas séries. Ainda neste capítulo, apresentam-se os resultados do ajuste e calibração do modelo MGB para a bacia de Furnas e sua aplicação ao modelo climático para obtenção das séries de vazões até 2100. Mediante as projeções de vazões e cenários de demanda energética, será apresentado o comportamento do reservatório de Furnas e aplicação de um modelo com recomendações e ações a serem adotadas para a gestão dos conflitos relacionados aos usos múltiplos da água.

As discussões, conclusões e recomendações do trabalho apresentam-se no Capítulo 5 e, os textos e documentos não elaborados neste trabalho que serviram de fundamentação, comprovação e

ilustração apresentam-se nos Anexos. Algumas partes do texto que não são fundamentais para leitura, ou que apresentam um grande número de gráficos ou equações, foram incluídas nos Apêndices.



## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Mudanças climáticas

Desde a década de 1980, evidências científicas sobre a possibilidade de mudança do clima global vêm despertando um interesse no público e na comunidade científica em geral. Em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estabeleceram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), quando a Assembleia Geral das Nações Unidas tratou da mudança do clima pela primeira vez.

O IPCC ficou encarregado de apoiar, com trabalhos científicos, as avaliações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro. As avaliações prévias foram publicadas em 1990, 1996 e 2001.

Segundo Marengo (2008), existem três “grupos de trabalho”: o Grupo 1 avalia os aspectos científicos do sistema climático e de mudança do clima, o Grupo 2 avalia os efeitos das mudanças climáticas sobre a natureza e a sociedade, e o Grupo 3 discute os métodos de adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

O Relatório de Avaliação do IPCC, que atualmente se encontra na sua quarta versão, descreve os avanços feitos na compreensão dos fatores humanos ou naturais que causam a mudança, as

observações da mudança, atribuição e estimativas da mudança do clima projetada para o futuro e os processos climáticos. O termo mudança do clima usado pelo IPCC refere-se a qualquer alteração climática ocorrida ao longo do tempo, devido à variabilidade natural ou decorrente de atividades humanas. Baseia-se em avaliações feitas em pesquisas anteriores pelo IPCC e incorpora novas descobertas dos últimos anos (IPCC, 2007a).

A definição de mudanças climáticas do IPCC é diferente da estabelecida durante a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em que o termo mudança do clima se refere a uma alteração climática que seja atribuída direta ou indiretamente à atividade humana, alterando a composição da atmosfera global, e seja adicional à variabilidade natural do clima observada ao longo de períodos comparáveis de tempo.

Já para Tucci (2002), o termo de variabilidade climática deve ser empregado para as variações de clima em função das condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações; enquanto que modificação climática são as alterações da variabilidade climática devido às atividades humanas.

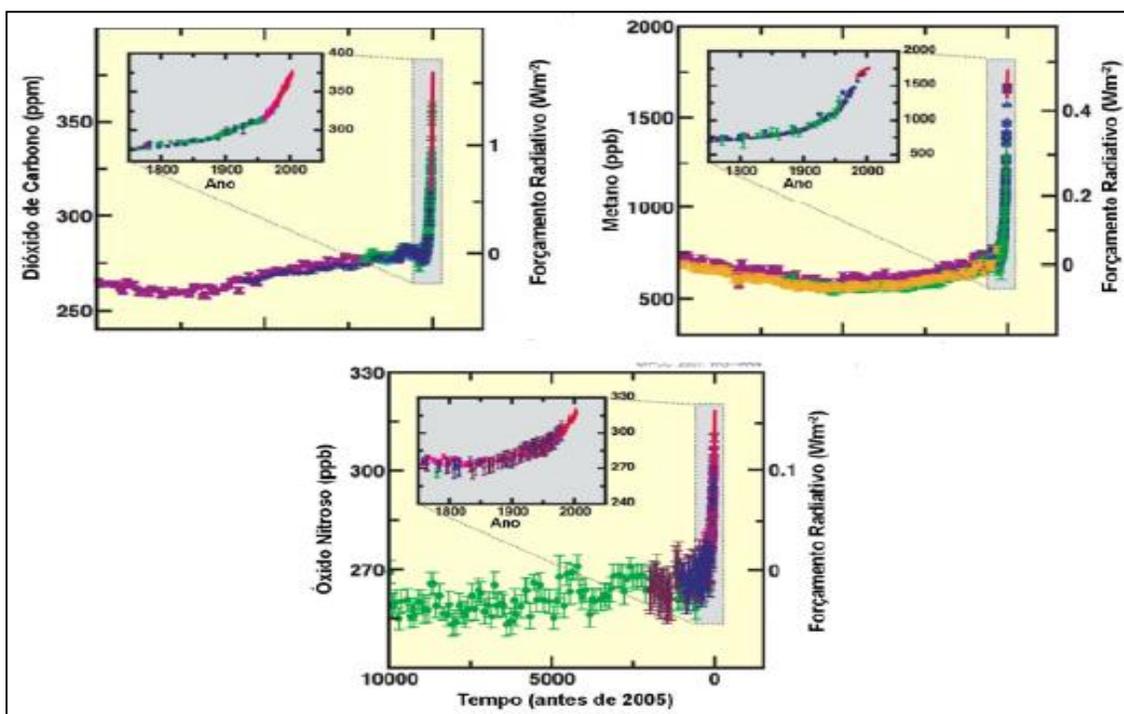
Para o IPCC, as mudanças climáticas são alterações no estado do clima que pode ser identificado por alterações na média ou na variabilidade das suas propriedades que persistem durante um período prolongado, variando de anos até décadas ou mais. As mudanças do clima podem ser causadas por processos internos naturais ou causadas por uma persistente mudança na composição da atmosfera e no uso do solo causado pelas atividades humanas (IPCC, 2012a).

O relatório do IPCC (2007b) afirma com 90% de confiabilidade que os efeitos das mudanças climáticas causadas pelo homem já estão acontecendo e suas consequências irão surtir efeito durante todo este século e além. Esta conclusão é bem robusta sobre uma vasta gama de cenários de emissões de gases de efeito estufa, incluindo os cenários que preveem redução nas emissões.

Os avanços científicos feitos desde a publicação do Terceiro Relatório de Avaliação (TRA) estão fundamentados em grandes quantidades de dados novos e mais abrangentes, análises mais sofisticadas e melhor compreensão dos processos, com a sua simulação em diversos modelos, e uma importante análise mais ampla das faixas de incerteza (IPCC, 2001a).

As mudanças na quantidade de gases de efeito estufa e aerossóis da atmosfera, na radiação solar e nas propriedades da superfície terrestre alteram o equilíbrio energético do sistema climático (IPCC, 2007a). Estas mudanças são expressas em termos do forçamento radiativo, que é usado para comparar a forma como os fatores humanos e naturais provocam o aquecimento ou o esfriamento do clima global, pois é uma medida da influência de um fator na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera, que é dada em  $Wm^2$  (IPCC, 2007a).

Desde a publicação do TRA em 2001, novas observações e a respectiva modelagem dos gases de efeito estufa, atividade solar, propriedades da superfície terrestre e alguns aspectos dos aerossóis promoveram melhorias nas estimativas quantitativas do forçamento radiativo. As concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono, metano e óxido nítrico (Figura 2.1) aumentaram bastante em consequência das atividades humanas desde 1750 e agora ultrapassam em muito os valores pré-industriais determinados com base em testemunhos de gelo de milhares de anos (IPCC, 2007b; IPCC, 2007a).



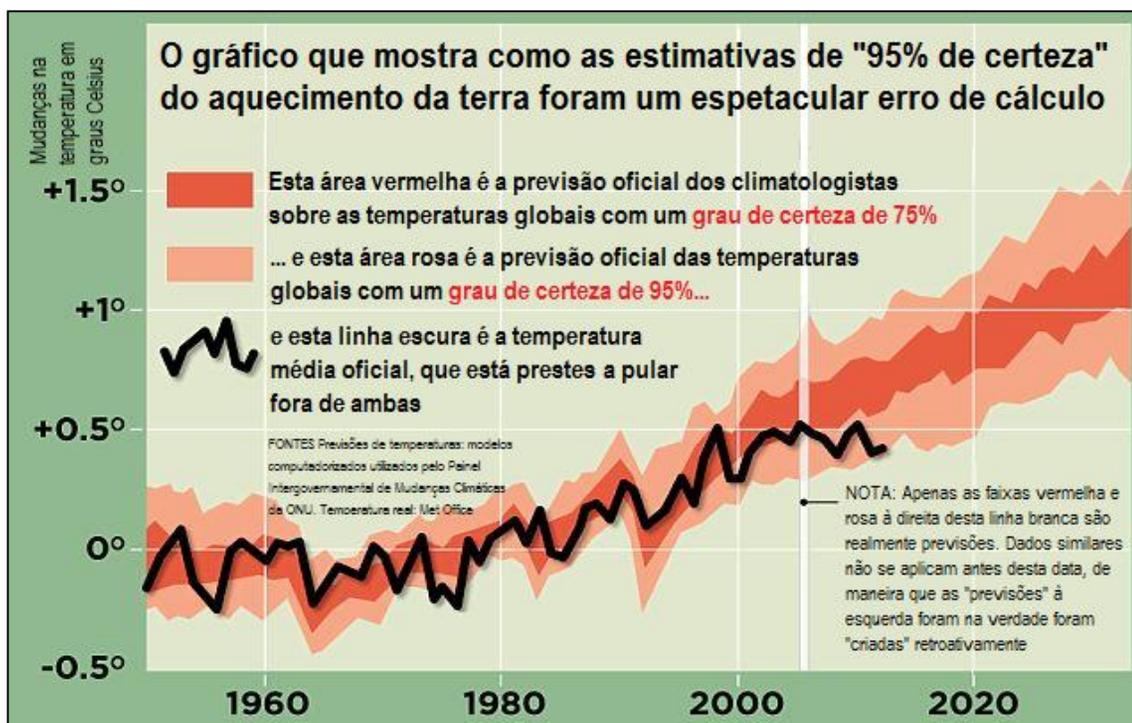
Fonte: IPCC (2007a).

Figura 2.1: Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nítrico ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis inseridos).

Quando se trata de um assunto polêmico e cheio de incertezas como mudanças climáticas, geram-se opiniões divergentes entre os próprios cientistas e a sociedade como um todo. Doran e Zimmerman (2009) estimam que mais de 90% dos cientistas climatologistas concordam que a atividade humana contribui para alguma alteração ou intensificação de algum fenômeno no clima global ou regional.

Segundo Whitmarsh (2011), uma boa parcela da sociedade britânica, principalmente, as pessoas mais idosas e tradicionalistas não acreditam ou são indiferentes aos estudos que mostram "supostas evidências" da mudança do clima. Um dos motivos dessa descrença apresentados por eles e até mesmo por alguns climatologistas são as incertezas e a facilidade de adulteração dos dados utilizados nas previsões dos modelos computacionais.

Seguindo a mesma linha de argumentação que contraria as mudanças climáticas, Rose (2013a) afirma que os equívocos nas pesquisas sobre mudanças climáticas custaram bilhões aos cofres britânicos em medidas desnecessárias para mitigação da emissão de gases de efeito estufa (Figura 2.2) e tiveram influência direta na alteração da política energética britânica, dando fortes subsídios para o desenvolvimento das energias renováveis.

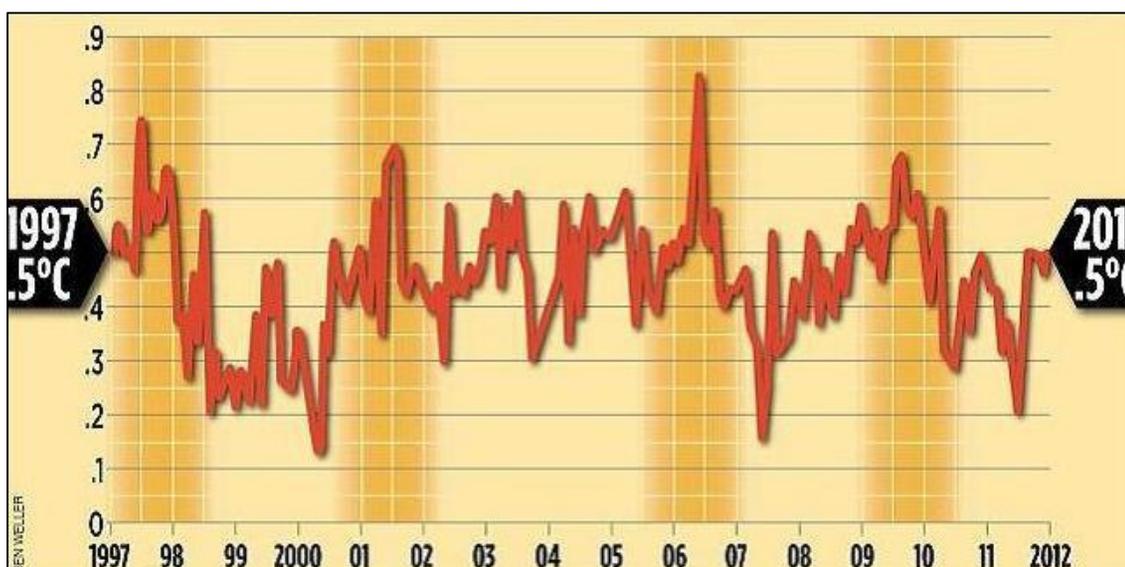


Fonte: Adaptado de Rose (2013a).

Figura 2.2: Gráfico de aquecimento global, publicado pelo jornal "The Daily Mail" de Londres.

Na Figura 2.2, o gráfico mostrou que as projeções de aumento da temperatura foram superestimadas e apontam que não houve aumento significativo desde 1997, fato este que levou pesquisadores a questionarem e reverem os estudos e projeções publicadas pelo IPCC, em relação a mudanças do clima.

De forma complementar ao que foi publicado, no fim de 2012, Rose (2013b) publicou que o serviço de meteorologia inglês *Met Office* revisou suas previsões e anunciou que não devem ocorrer mudanças até 2017, afirmando que a perspectiva é que os próximos anos sejam mais frios. O gráfico do *Met Office* 'HadCRUT4' foi feito com dados extraídos de mais de 30 mil postos de medição (Figura 2.3).



Fonte: Rose (2013b).

Figura 2.3: Mudanças globais de temperaturas - *Met Office* 'HadCRUT4'.

De acordo com o gráfico do *Met Office*, Piers Forster (apud Rose, 2013b), professor de Mudança Climática na Universidade de Leeds, afirma que o fato de as temperaturas globais na superfície da Terra não terem aumentado nos últimos 15 anos, combinado com o bom conhecimento das mudanças climáticas, tornam todas as estimativas exageradas”.

No entanto, o professor de ciência ambiental e política da Colorado University, Roger Pielke Jr., disse que os erros apontam para a uma "avaria sistemática nos procedimentos do IPCC", o que significa que poderia haver mais erros.

Em 2010, foram descobertos cinco erros referentes ao relatório do IPCC de 2007 que estão relacionados aos estudos que sugerem que as geleiras do Himalaia podem derreter completamente até o ano 2035, centenas de anos mais cedo (2350) do que os dados realmente indicam. Aparentemente, o ano de 2350 foi invertido para 2035.

Contudo, os cientistas, incluindo alguns críticos do IPCC, afirmam que os erros não invalidam a principal conclusão de que o aquecimento global é, sem dúvida, provocado pela atividade humana e uma ameaça.

Segundo Souza (2010), a hipótese de fraude nos estudos do IPCC ficou mais evidenciada quando um grupo de hackers capturou e divulgou mais de 1000 e-mails trocados entre cientistas ligados à Universidade de East Anglia, na Inglaterra, um dos principais centros mundiais de climatologia. As mensagens revelam que cientistas distorceram gráficos para provar que o planeta nunca esteve tão quente nos últimos 1000 anos. As trocas de e-mails mostram que os climatologistas defensores da tese do aquecimento global boicotam os que divergem de suas opiniões, recusando-se a repassar dados das pesquisas que realizam. Os e-mails deixam claro, ainda, que o grupo dos catastrofistas age para tentar impedir que os céticos (como são chamados os cientistas que divergem das teses do IPCC) publiquem seus trabalhos nas revistas científicas mais prestigiosas.

O pesquisador Molion (2008) afirma que o clima da Terra tem variado ao longo das eras, forçado por fenômenos de escalas de tempo decadal até milenar. O autor afirma que, no final da década de 1970, após um período de 30 anos de resfriamento, surgiu a hipótese de que a temperatura média global da superfície estaria aumentando devido à influência humana, baseada nos seguintes argumentos: a série de temperatura média global do ar na superfície “observada” nos últimos 150 anos, o aumento observado na concentração de gás carbônico e os resultados obtidos com modelos numéricos de simulação de clima.

Segundo o autor, discutiram-se esses três aspectos, mostrando suas deficiências, e concluiu-se que a representatividade global da série de temperaturas é questionável, e a possível intensificação do efeito estufa pelas atividades humanas bem como as limitações dos modelos matemáticos de simulação de clima não justificam a transformação da hipótese do aquecimento global antropogênico em fato científico consumado. Apresentaram-se argumentos que sugerem que um resfriamento global, nos próximos 15 a 20 anos seria igualmente provável, em face do conhecimento atual que se tem do clima global e de sua

variabilidade. Para os climas brasileiros, o resfriamento produz impactos socioeconômicos negativos, pois reduz as chuvas de maneira geral e submete o Sul e Sudeste a uma frequência maior de geadas no inverno.

Para os pesquisadores Treut et al. (2008), a questão chave para o futuro dos modelos globais é até quando o aumento progressivo da resolução da grade, bem como do número de parametrizações, poderá melhorar a sensibilidade climática do modelo, como a formação de nuvens em baixas altitudes, por exemplo. Esse e outros tipos de problemas, como limitações e incertezas é que levam à dúvida sobre a real situação do clima global; ou seja, se realmente haverá ou já estão acontecendo essas mudanças no clima.

### 2.1.1 Evidências de mudanças no clima

Dentre as pesquisas que objetivaram avaliar o estudo das variáveis do clima, Tucci (2002) avaliou o comportamento das variáveis vazão e precipitação antes e depois da década de 1970 nas bacias do Grande, Tietê e Paranapanema, sendo observado um aumento de ambas as variáveis em todas as regiões. Contudo, o autor afirma que existem várias incertezas que dificultam uma identificação cabal, quantitativa de quais são as causas dessas alterações.

Ainda neste estudo, o autor cita os estudos de Tucci e Clarke (1998) e Collischonn et al. (2001), que mostraram que bacias na América do Sul e na África apresentavam períodos longos com tendências diferentes. Enquanto a América do Sul apresentou aumento de precipitação e vazão após 1970, na África houve redução. Contudo, esses pesquisadores também não podem afirmar se essas tendências são de longo prazo e se este comportamento pode ter sido influenciado por condições antrópicas como o uso do solo ou o aquecimento devido ao efeito estufa.

No clima, as mudanças em regimes de extremos de curto e longo prazos poderiam ser semelhantes aos extremos de chuva e temperatura que se vêm registrando na América do Sul. Alguns eventos na América do Sul podem ser citados nos últimos anos, como: as secas de 2005, na Amazônia (MARENGO et al., 2008) e de 2006 no sul do Brasil; o furacão Catarina de 2004, no sul do Brasil (PEZZA e

SIMMOND, 2005). Todos esses eventos causaram fortes impactos nos diferentes ecossistemas e, conseqüentemente, na população e na economia regional e nacional.

No relatório do IPCC 2001b, foram apresentadas evidências de alterações do clima, dentre os quais se destacam:

- a temperatura média do mar no globo em geral tem aumentado desde 1861. No século vinte, o aumento ficou entre  $0,6 \pm 0,2^\circ \text{C}$ . O aquecimento ocorreu principalmente em dois períodos 1910 – 1945 e 1976 – 2000;
- dados de maré têm mostrado que a média global do nível do mar aumentou cerca de 0,1 a 0,2 m durante o século vinte;
- dados de satélite mostraram que é muito provável que tenha ocorrido diminuição de cerca de 10% da cobertura de neve desde o final dos anos 60;
- em grande parte da América do Sul, principalmente bacia do Prata, as vazões e as precipitações aumentaram depois de 1970;
- entre 1950 e 1993 a temperatura mínima noturna na terra aumentou cerca de  $0,2^\circ \text{C}$  por década. Este é duas vezes maior que a proporção do aumento da temperatura do dia. O aumento da temperatura da superfície do mar sobre o período é cerca de metade da temperatura média do ar na terra.

No Brasil, algumas evidências de alterações do clima puderam ser diagnosticadas, com um aquecimento de cerca de  $0,7^\circ \text{C}$  nos últimos cinquenta anos, valor mais alto que a melhor estimativa de aumento médio global que foi de  $0,64^\circ \text{C}$  (IPCC, 2007a). Como possível consequência das mudanças, Marengo et al. (2011a) citam que no período 2005 – 2010 ocorreram duas grandes secas e uma das piores enchentes já vistas na Amazônia, sendo que houve um recorde no nível dos rios em Manaus em 2009, e no ano seguinte, uma das maiores baixas da história.

Os estudos que utilizaram análise estatística para validar evidências sobre mudanças ocorridas no clima são apresentados na seção 2.2, deste trabalho.

## 2.1.2 Cenários climáticos do IPCC

Logo após a publicação do Segundo Relatório de Avaliação (SRA) do IPCC em 1996, os cientistas do IPCC deram início ao desenvolvimento de um novo conjunto de cenários de emissões, mais eficaz e mais complexo que o utilizado até então, o cenário futuro de emissão IS92 a-f. Este cenário pode ser considerado como sendo o primeiro cenário global de emissões de gases de efeito estufa, que serviu como um esboço ou uma base para os demais cenários que seriam gerados no futuro, pois ele continha um conjunto completo de gases de efeito estufa; porém a sua grande limitação era que ele apresentava apenas uma projeção de emissões de gases estufa no futuro (IPCC, 2001a).

No segundo relatório de avaliação do IPCC, foram propostos quatro diferentes enredos ou cenários de desenvolvimento global futuro (A1, A2, B1 e B2), com o objetivo de descrever e prever de forma consistente e simplificadas as relações entre as forças motrizes de emissões e sua evolução ao longo do tempo (NAKICENOVIC et al., 2000). O resultado final deu origem ao Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (RECE), descrevendo os pontos principais dos quatro enredos de desenvolvimento global e seus diversos cenários de emissões.

Cada cenário futuro de emissão representa uma quantificação específica de cada um dos quatro enredos. Os cenários que são baseados num mesmo enredo constituem uma “família” de cenários (NAKICENOVIC et al., 2000). O relatório descreve ao todo 40 cenários diferentes, abrangendo todas as famílias, dentre os quais 35 cenários contêm dados sobre toda uma gama de gases necessários aos modelos climáticos, como os gases de efeito estufa e o enxofre, sempre levando em consideração os aspectos demográficos, econômicos e tecnológicos (NAKICENOVIC et al., 2000).

Os Cenários do RECE não incluem ou consideram iniciativas globais ou regionais no controle de emissões de gases de efeito estufa ou controle do clima, como o protocolo de Kyoto ou uma política governamental de menores emissões, por exemplo (IPCC, 2012a). As quatro famílias de cenários receberam os mesmos nomes dos seus enredos originários: A1, B1, A2 e B2, descritos brevemente a seguir e representados na Figura 2.4.

- A1 - O contexto e a família de cenários A1 descrevem um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século e declinando em seguida e a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. As principais questões subjacentes são a convergência entre as regiões, a capacitação e o aumento das interações culturais e sociais, com uma redução substancial das diferenças regionais na renda per capita. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica: intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1FI), fontes energéticas não fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B), em que o equilíbrio é definido como não se depender muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final.
- A2 - O contexto e a família de cenários A2 descrevem um mundo muito heterogêneo. O tema subjacente é a autossuficiência e a preservação das identidades locais. Os padrões de fertilidade entre as regiões convergem muito lentamente, o que acarreta um aumento crescente da população. O desenvolvimento econômico é orientado primeiramente para a região, sendo que o crescimento econômico per capita e a mudança tecnológica são mais fragmentados e mais lentos do que nos outros contextos.
- B1 - O contexto e a família de cenários B1 descrevem um mundo convergente com a mesma população global, que atinge o pico em meados do século e declina em seguida, como no contexto A1, mas com uma mudança rápida nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informações, com reduções da intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes em relação ao uso dos recursos. A ênfase está nas soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, inclusive a melhoria da equidade, mas sem iniciativas adicionais relacionadas com o clima.
- B2 - O contexto e família de cenários B2 descrevem um mundo em que a ênfase está nas soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. É um mundo em que a população global aumenta continuamente, a uma taxa inferior à taxa do A2, com níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica menos rápida e mais diversa do que nos contextos B1 e A1. O cenário também está orientado para a proteção ambiental e a equidade social, mas seu foco são os níveis locais e regionais.



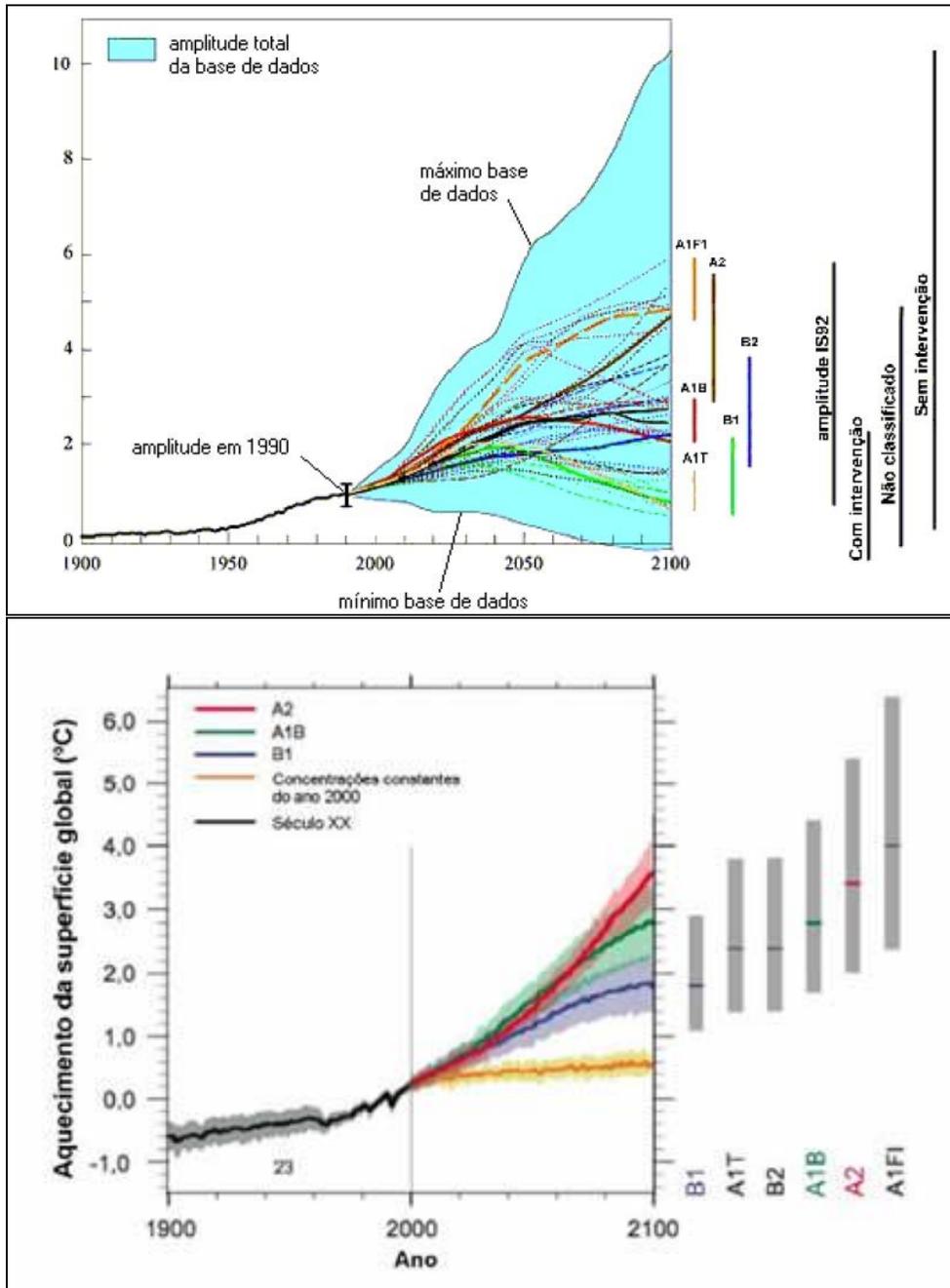
Fonte: Adaptado por CCIS (2012).

Figura 2.4: Representação esquemática da família do cenário SRES.

Na Figura 2.4, pode ser observado que as famílias A1 e A2 têm um foco mais voltado para a economia, se comparadas a B1 e B2, que são mais voltadas às questões ambientais. Em compensação, as famílias A1 e B1 são mais preocupadas com aspectos globais do que A2 e B2 cujo viés é mais regional.

Atualmente, esses cenários de emissão são usados como hipótese de trabalho nas projeções para o clima futuro do planeta, obtidas por meio de modelos numéricos computacionais complexos. A Figura 2.5 apresenta as projeções de emissões de gases estufa e como consequência o aumento da temperatura média global para cada cenário citado acima. Essas projeções levam em conta todo o período do século XXI.

Ao analisar a Figura 2.5, observa-se que mesmo considerando o melhor cenário proposto pelo IPCC, que mantém constante a projeção de emissão de gases, as projeções climáticas apontam um aumento na temperatura média global próxima de dois graus Celsius. As barras laterais representam as incertezas ou variações da temperatura de cada cenário que dependendo do local do globo existirão variações regionais no aquecimento global, sendo que alguns lugares podem sofrer mais com o aquecimento, enquanto em outros lugares, o aquecimento não será muito significativo ou sentido. Na Figura 2.5 são apresentadas as variações das projeções futuras de cada cenário de emissão de gases estufa e consequente aquecimento ou aumento da temperatura média global provocada por esses gases.



Fonte: Adaptado de IPCC (2007a).

Figura 2.5: Cenários de emissões de gases de efeito estufa utilizados pelo IPCC e consequente aumento da temperatura média.

### 2.1.3 Efeitos das Mudanças Climáticas

Estudos recentes foram realizados sobre cenários de mudanças climáticas, e na América do Sul, um dos principais pontos de estudo vem sendo o Brasil. Em alguns deles se observam mudanças significativas no clima e extremos climáticos e seus impactos nos diversos sistemas físicos e biológicos.

Ribeiro (2008) afirmou que existem diversas formas de riscos decorrentes das mudanças climáticas globais nas cidades brasileiras e classifica que esses podem ocorrer em função do aumento da temperatura, das chuvas intensas e elevação do nível do mar.

Com relação à temperatura, o autor afirma que são previstos dias e noites mais quentes e em maior quantidade em relação aos dias atuais, fato esse que pode repercutir nos hábitos por meio de mudanças no uso das edificações. Caso ocorra um crescimento das emissões, tende haver um aumento de internações de doentes por problemas respiratórios.

Sobre o aumento das chuvas intensas, Ribeiro (2008) alerta sobre o agravamento de problemas, ou seja, alagamentos e escorregamentos de encostas. Em relação à elevação do nível dos oceanos, os maiores problemas devem estar relacionados à circulação de carros e alterações nas redes de esgoto.

Para Marengo (2008), as projeções de mudança nos regimes e distribuição de chuva, derivadas não são conclusivas, e as incertezas ainda são grandes, pois dependem dos modelos e das regiões consideradas.

Valverde e Marengo (2010) fizeram uma análise sobre as mudanças no padrão de circulação que possam vir a acontecer no clima da América do Sul, ao longo do século XXI, dividindo em três períodos de 30 anos (2010 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2100), utilizando cinco modelos globais do IPCC AR4 (CCCMA, GFDL, HadCM3, MIROC e GISS), para o cenário A2 do IPCC (NAKICENOVIC et al., 2000).

Segundo os autores, as características comuns que os modelos apresentaram (a exceção do MIROC) para as três climatologias futuras, principalmente, no verão e na primavera, foram o deslocamento da baixa continental (associada à baixa do Chaco) para o sudoeste da sua posição histórica climatológica

(1961-1990) e da Alta da Bolívia para o noroeste. Além disso, os cinco modelos simularam, para o clima presente, uma Alta do Pacífico Sul (APS) menos intensa em relação à Reanálise do NCEP (*National Center for Environmental Prediction*), sugerindo menor subsidência sobre a sua região de atuação. Os modelos que se destacaram neste estudo foram o HadCM3 e GISS. O modelo HadCM3 simulou a circulação de verão e primavera mais próxima à Reanálise e uma área menor de anomalias negativas de chuva sobre a Amazônia, em relação aos outros modelos.

Lázaro et al. (2011) fizeram uma proposta de metodologia de avaliação quanto à representação da variabilidade interanual e interdecadal da precipitação dos modelos globais do IPCC, sobre a região Nordeste Setentrional do Brasil.

Apesar de a análise das rodadas dos modelos do IPCC apresentar grandes divergências em representar a variabilidade interanual e interdecadal na região nordeste setentrional, boa parte apresenta boas correlações em relação à precipitação observada (acima de 0,69). Dentre todos os modelos do IPCC analisados, merecem destaques os modelos CSIRO\_MK3, GISS\_MODEL e UKMO\_HadCM3, pois representam de maneira satisfatória as variabilidades interanual e interdecadal do padrão de chuva sobre o nordeste setentrional.

Em outro experimento, Marengo et al. (2011b) fizeram um estudo avaliando as possíveis mudanças climáticas para os anos de 2011 a 2100, simuladas pelos quatro membros do modelo Eta, para o cenário A1B do IPCC, contemplando a América do Sul e três grandes bacias hidrográficas brasileiras (Amazônica, Paraná e São Francisco). Nesse estudo, os autores concluíram algo semelhante a outros trabalhos; ou seja, haverá uma grande redução na precipitação nas bacias Amazônica e do São Francisco, por volta de 40% a menos no final do século, um aumento da precipitação na região da costa entre o Peru e Equador, chegando a um aumento de 30% no norte da Argentina, sendo que todas essas mudanças se tornam mais intensas após o ano de 2040.

Os autores afirmam também que a diferença entre a precipitação e evaporação sobre a bacia Amazônica e do São Francisco podem ocasionar um déficit hídrico nestas regiões e uma redução nas vazões dos rios, aumentando a susceptibilidade a condições mais secas.

A partir do ano de 2040, o planeta começará a esquentar mais, por volta de +2,5°C em escala global e de 2,5 a 3,5°C em escala regional. Para os últimos 30 anos do século, as temperaturas aumentarão numa faixa que vai de 3,5 a 5°C, proporcionando maior evaporação; contudo, a umidade gerada é levada para outra região devido às mudanças de direção e intensidade dos ventos na alta atmosfera. Apenas a bacia do Paraná tende a não apresentar grandes mudanças na precipitação média, com uma queda de apenas 2% na média. Já para o nordeste do Brasil, o maior problema seria o aumento da seca e da falta de água.

Ainda no Brasil, Nóbrega et al. (2011) realizaram um estudo para quantificar possíveis alterações nas vazões do Rio Grande, um importante afluente do Rio Paraná, situado em uma das bacias mais importantes do Brasil para o abastecimento de água e geração de energia. Foram realizadas projeções por meio de associações de emissão de gases de efeito estufa nos cenários (A1B, A2, B1, B2) e o incremento global da temperatura de 1° a 6° utilizando o modelo HADCM3. Neste caso, os resultados mostram que pode haver uma variação de (+/-) 10 % na vazão média do curso d'água, que pode afetar a produção de energia, fato esse que pode acelerar o processo para implantação das hidrelétricas na Amazônia ou a implantação de térmicas, que são fontes de geração mais poluentes.

Após o quarto Relatório de Avaliação do IPCC em 2007, o número de estudos sobre os impactos das mudanças climáticas vem aumentando em todo o mundo, especialmente sobre os efeitos da precipitação. Essa preocupação se deve, principalmente, pelo fato de a precipitação ser a principal variável de entrada no ciclo hidrológico. Desse modo, é importante entender a magnitude da alteração, para cada cenário de mudança climática (CHIEW et al., 2009).

O relatório conclui também que está previsto uma maior frequência de ondas de calor em áreas urbanas, com maior intensidade e duração. Além disso, pode-se prever uma deterioração da qualidade do ar e o aumento de áreas de risco, em especial nas cidades tropicais, cada vez mais sujeitas às chuvas intensas que podem provocar escorregamentos de encostas e alagamentos.

Xu et al. (2011) estudaram as incertezas sobre os impactos das mudanças climáticas sobre dois rios importantes na China: Xiangxi e Huangfuchuan que são afluentes dos importantes rios Yangtze e Amarelo, respectivamente. Foi feita uma comparação com sete modelos globais do IPCC, sendo considerados quatro cenários climáticos de emissão do IPCC.

Uma das conclusões mais notáveis é que ambos os rios apresentam aumento em suas vazões para todos os modelos e em todos os cenários climáticos. O aumento é mais significativo no rio Huangfuchuan, que fica situado em uma região de semiárido no Norte da China, do que no rio Xiangxi, que está localizado em uma região subtropical úmida no Sul da China. As projeções dos cenários climáticos futuros apontam um aumento na vazão média anual razoável no rio Xiangxi (13 a 17%) e um aumento muito grande para o rio Huangfuchuan, chegando a mais que o dobro de sua vazão (73 a 121%).

Entretanto, os autores afirmam que há uma incerteza substancial nos resultados, principalmente devido aos erros sistemáticos dos modelos globais. Para uma condição de elevação na temperatura de 2°C e no cenário de emissões A1B, existe uma incerteza nos valores dos modelos, como por exemplo: para o rio Xiangxi, as vazões de cheia ( $Q_5$ ) variam de -1% a +41%, para as vazões de estiagem ( $Q_{95}$ ), essa variação é ainda maior: +2 a +55%.

Hughes et al. (2011) fizeram uma análise de quais seriam as respostas hidrológicas para as incertezas climáticas futuras no rio Okavango na África do Sul. Foram analisados sete modelos climáticos globais. Esse estudo é parecido com a análise feita por Xu et al. (2011). A diferença é que ele analisou somente a variação da temperatura, com aumento de 2 °C na escala global. Para as condições de aquecimento de 2 °C na média global, cinco dos sete modelos estudados apresentam aumento aproximado de 10% na vazão anual média, sendo que os demais apresentam um aumento da ordem de 30%.

Outro estudo interessante foi realizado por Thorne (2011), cujo trabalho faz uma análise sobre os possíveis efeitos das mudanças climáticas em áreas montanhosas localizadas em altas latitudes. O autor realizou estudos na bacia do rio Liard, localizada na região subártica do Canadá, que apresenta suas particularidades, pelo fato de ocorrer aumento natural da vazão no início da primavera devido ao derretimento do gelo, que dificulta a quantificação quanto às tendências climáticas futuras.

Ainda nessa pesquisa, o autor trabalhou com sete modelos globais, utilizando uma variação na temperatura média global de 1 a 6 °C, assumindo que ao longo do período futuro não haverá mudanças significativa no uso do solo, bem como sua composição. De modo geral, as conclusões apontam que as inundações da primavera chegam mais cedo e com maior intensidade, devido ao aquecimento do ar, que deve prejudicar o período do verão, no qual a vazão tende a declinar devido à falta de gelo. Em geral, a vazão média anual deve aumentar, mas este aumento não tende a ser para todo o período.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos valores simulados para um cenário de mudança na temperatura média global em 2 °C. Os valores apresentados correspondem à diferença expressa em porcentagem em relação às vazões do clima presente. Nota-se que existe uma grande variação entre os períodos e os modelos globais analisados, porém na bacia do Liard, na média, a vazão apresenta uma tendência de aumento, especialmente no período do início do degelo; ou seja, no período úmido da região.

Conforme mencionado anteriormente, a primavera apresenta uma maior variação na vazão em relação à vazão para o clima atual, chegando a valores superiores a 40% de aumento na vazão média. Apenas no verão pode ocorrer um decréscimo da vazão, podendo atingir a -22%.

Tabela 2.1: Diferenças entre as vazões simuladas para o clima futuro com um aquecimento de 2°C em relação à vazão do clima presente na bacia do rio Liard, no Canadá.

<b>Modelo Global</b>	<b>Inverno (%)</b>	<b>Primavera (%)</b>	<b>Verão (%)</b>	<b>Outono (%)</b>
<b>CCCMA</b>	11	28	10	21
<b>CSIRO</b>	5	19	-3	12
<b>HadCM3</b>	4	26	1	14
<b>IPSL</b>	5	41	-22	11
<b>MPI</b>	12	33	-11	28
<b>NCAR</b>	7	24	2	14
<b>HadGEM1</b>	5	34	-12	1

Fonte: Modificado de Thorne, (2011).

O autor concluiu seu trabalho afirmando que apesar das incertezas dos modelos na mudança do clima futuro projetadas para a região subártica, pode-se dizer que o regime do rio Liard será mantido no futuro, porém a magnitude da vazão devido às mudanças climáticas ainda é muito incerta.

Recentemente, o IPCC publicou um novo relatório especial, que trata dos potenciais riscos ou aumentos dos eventos climáticos extremos, devido às mudanças climáticas futuras.

Segundo o IPCC (2012b), mudanças no clima implicam em mudanças na frequência, intensidade, na extensão espacial e na duração do evento crítico. Existe a possibilidade de que alguns eventos climáticos críticos, como cheias ou secas, ocorram devidos ao acúmulo de eventos sucessivos não extremos, porém essa acumulação de eventos não críticos tem o efeito de eventos extremos.

O relatório lembra também que muitos eventos climáticos extremos são resultados de eventos naturais que variam ao longo do tempo, como o El Niño por exemplo. Esses eventos ocorrem de forma natural, ou seja, mesmo se não houvesse atividades humanas esses eventos devem continuar a acontecer.

Porém, o relatório afirma que há uma tendência de aumento da frequência das precipitações mais intensas durante o século XXI em diversas partes do globo, principalmente nas regiões de altas latitudes e tropicais, devido às atividades humanas, por exemplo: eventos de chuvas com tempo de recorrência de 20 anos podem diminuir esse tempo de recorrência para cinco anos para determinadas regiões (IPCC, 2012b).

Se os modelos climáticos conseguem reproduzir o clima sazonal presente e passado, possivelmente as suas projeções futuras poderão ser menos incertas. Sendo assim, uma consideração inicial a ser feita é que os modelos climáticos ainda não conseguem reproduzir com alto grau de confiabilidade o padrão sazonal que a climatologia observacional apresenta. No entanto, os modelos conseguem simular coerentemente o ciclo anual, apesar dos vieses sistemáticos encontrados. Por esse motivo, constituem-se na principal ferramenta de previsão de clima. É importante lembrar que cenários futuros do clima apenas são projeções de prováveis mudanças que possam vir a acontecer como produto do aumento nas concentrações dos gases de efeito estufa (VALVERDE e MARENGO, 2010).

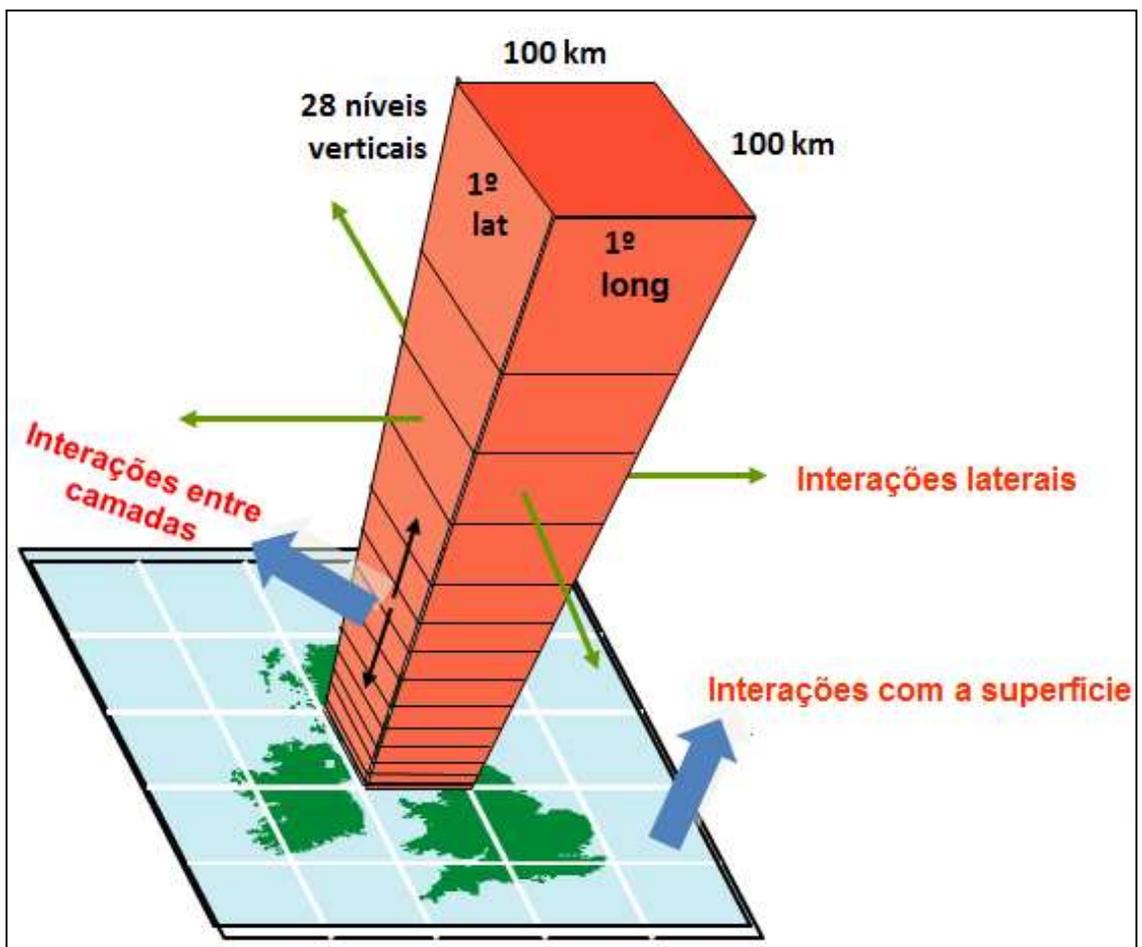
Conforme verificado, os estudos sobre as projeções do comportamento do clima são baseados nas premissas e projeções dos modelos climáticos do IPCC, que são mais bem detalhados na seção 2.1.4.

#### 2.1.4 Modelos de Circulação Geral (GCM)

Para procurar avaliar quais seriam as alterações climáticas devidas ao efeito estufa, foram desenvolvidos modelos globais climáticos ou modelos climáticos globais (CGMs), que são modelos matemáticos tridimensionais no espaço que consideram os principais processos que governam os movimentos da atmosfera e dos oceanos. Para isso, resolve-se uma série de equações que descrevem os fluxos de energia, momento, conservação de massa e leis dos gases.

A superfície terrestre e dos oceanos é dividida ou representada por uma grade de células regulares com centenas de quilômetros, e cada ponto de grade ou célula é composto por várias camadas ou níveis verticais na atmosfera, e todas essas células e camadas se comunicam entre si (Figura 2.6).

A representação gráfica do modelo global serve para ilustrar a complexidade das interações dos fenômenos físicos que ocorrem na atmosfera e na superfície terrestre e dos oceanos, porém de forma bem simplificada.



Fonte: Climate prediction.net (2012).

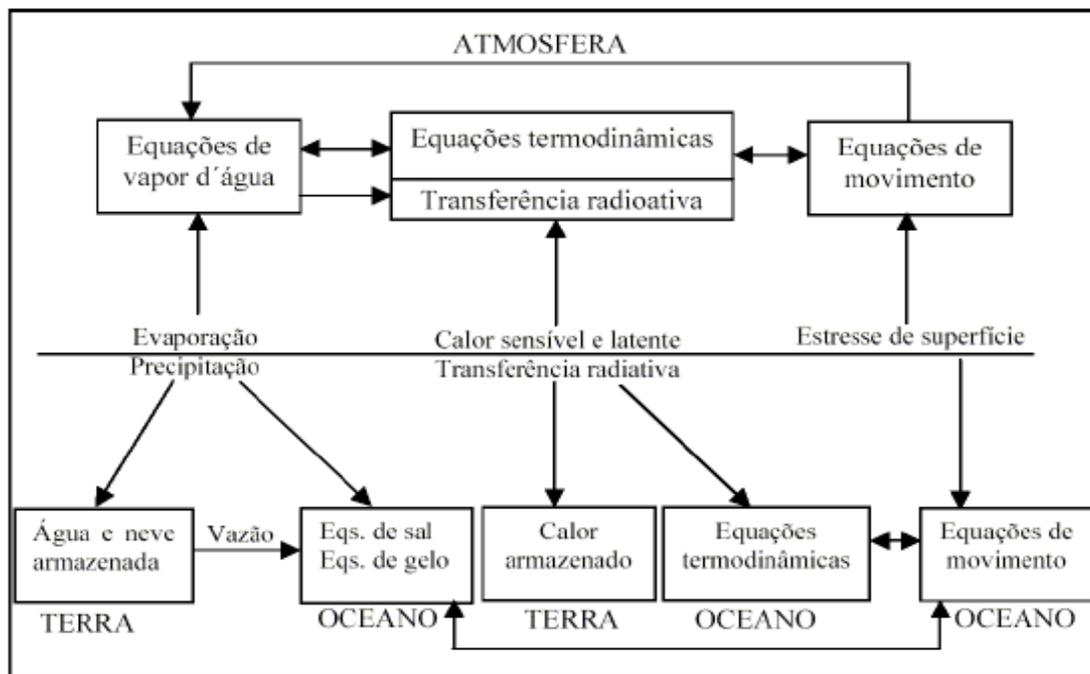
Figura 2.6: Esboço da discretização espacial dos modelos globais, grade sobre a Grã-Bretanha.

Segundo o IPCC 2012b, os modelos que representam o clima do globo usam valores médios globais, mas não consideram as variabilidades temporais e espaciais do processo. Modelos verticais ou

horizontais unidimensionais têm permitido analisar os vários elementos climáticos, mas com resultados limitados.

A principal razão é a resolução espacial destes métodos, que por vezes são da ordem de centenas de quilômetros, de forma que, forçantes de mesoescala (topografias complexas, cobertura vegetal, grandes lagos e rios) e uma gama de processos físicos (nuvens, processos de turbulência) com escala espacial inferior à resolução espacial da “grade” do modelo acarretam erros no decorrer da integração, limitando assim, a possibilidade de simular/prever com precisão satisfatória alguma variação, por exemplo, da temperatura ou da precipitação, em escala regional (NICOLINI et al. 2002; MISRA et al., 2003; NOBRE e MALAGUTTI, 2004).

Na Figura 2.7, ilustra-se uma representação esquemática dos principais processos simulados pelos modelos globais, que, geralmente, discretizam o globo em elementos horizontais, ou uma grade de células regulares, cujo tamanho pode variar da ordem de 100 a 1000 km e as camadas variam de 1 a 5 km na vertical (IPCC, 2001a; IPCC, 2007a).

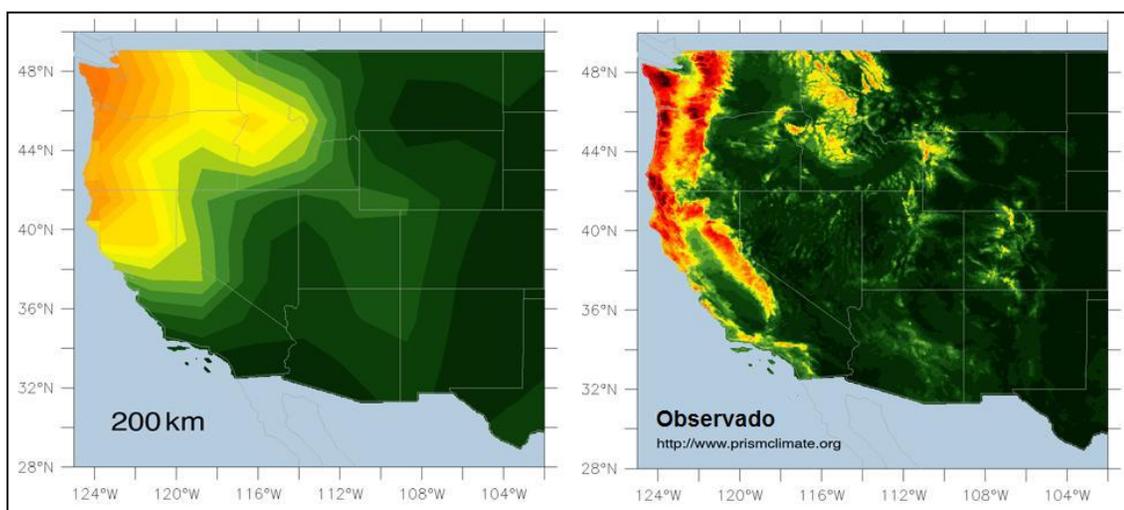


Fonte: Adaptado de Kimura (2002).

Figura 2.7: Interações entre atmosfera, oceanos e continentes, representadas pelos modelos globais.

Como a grade desses modelos possui células muito grandes, isso pode limitar a discretização de determinadas regiões, pois a representação de certas características ou processos físicos é camuflada, como a topografia, por exemplo, pois os processos físicos do sistema em cada elemento da grade são valores médios (IPCC, 2001a).

Vale lembrar que a tendência é que esses modelos possuam um tamanho de grade cada vez mais reduzido e mais complexo (Figura 2.8).



Fonte: Modificado de GFDL (2012) .

Figura 2.8: Representação da topografia por um modelo global com grade de 200 km, comparada com a topografia real observada no Oeste dos EUA.

No caso dos oceanos, sua dinâmica é governada pela quantidade de radiação disponível na superfície, pelo atrito do vento imposto pela atmosfera e pela disposição geográfica dos continentes. Os modelos oceânicos normalmente calculam a evolução temporal das variáveis de velocidade, temperatura e salinidade. Muitos modelos climáticos possuem modelos oceânicos muito simplificados, que não incluem explicitamente a dinâmica dos oceanos.

Dentre as principais limitações dos modelos globais, em relação às aplicações em recursos hídricos, pode-se destacar:

- a) a discretização retrata somente os processos atmosféricos de macroescala na superfície da terra;
- b) muitos processos ainda são representados com algumas limitações no modelo, tais como os processos hidrológicos, por exemplo, que variam na microescala. Atualmente, existem diversos projetos e modelos no globo que buscam melhorar mais essa representação (IPCC, 2007a; KUNDZEWICZ et al. 2005);
- c) o custo e o tempo de processamento para uma discretização mais detalhada destes modelos ainda é elevado, necessitando de supercomputadores (IPCC, 2007a).

Para uma avaliação melhor das possíveis mudanças climáticas em uma dada região do globo, os modelos globais ainda não são muito precisos na sua representação, pois a variação climática é dada por diversos fatores, como a topografia, por exemplo, que podem ser mascarados, pois a resolução de uma célula do modelo Global ainda é muito grande (MARENGO et al., 2009).

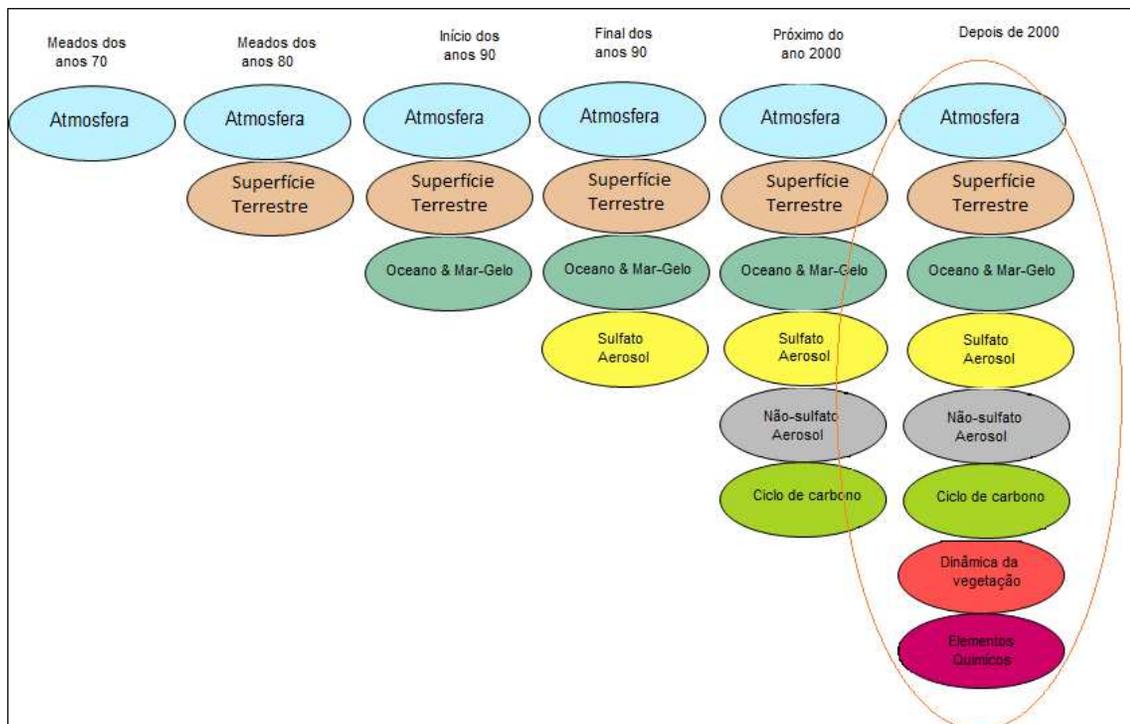
Disso, surge a necessidade de cada vez mais melhorar ou criar modelos climáticos capazes de representar o clima regional, ou com uma grade em menor escala. Uma das possibilidades de hoje é criar modelos derivados dos modelos globais com maiores detalhes regionais, enfim com uma representação do clima mais confiável (CHIRSTENSEN et al., 2007).

### 2.1.5 Modelos globais adotados pelo IPCC

Os modelos acoplados vêm evoluindo e melhorando de forma significativa desde o Segundo Relatório de Avaliação (SRA) do IPCC. Em geral, eles fornecem simulações de clima confiáveis, porém em menores escalas, ou seja, em escala subcontinental e em escalas temporais curtas que variam de sazonal a decadal (IPCC, 2007c).

Porém, esses modelos ainda não são capazes de simular com boa precisão todos os aspectos do clima, como por exemplo, as nuvens e umidade ainda continuam a ser grandes fontes de incerteza; contudo, tem havido melhorias incrementais em simulações desses parâmetros (IPCC, 2007c).

Na Figura 2.9, ilustra-se a evolução dos modelos, em termos de aumento da complexidade e capacidade de representação dos processos físicos. Nota-se que houve um grande salto na complexidade dos modelos a partir do final da década de 1990 e meados dos anos 2000. Isso se deve ao fato da evolução acelerada da capacidade de processamento dos computadores.



Fonte: Modificado de GFDL, (2012).

Figura 2.9: Evolução do aumento da complexidade dos modelos climáticos globais.

Segundo o GFDL (2012), o tamanho das células influi diretamente no tempo computacional de resolução das equações do modelo. Quanto mais fina for a resolução do modelo, implica um número maior de células da grade, requerendo computadores cada vez maiores e mais velozes para realizar as simulações em tempo hábil. Porém, se o modelo possuir uma grade com uma resolução muito baixa, ou seja, as células forem muito grandes, os resultados dos modelos vão ser menos detalhados e mais propensos a equívocos.

Para o IPCC-AR4, foram desenvolvidos 25 modelos globais de diferentes centros de pesquisa. Porém, nem todos conseguem representar bem a climatologia e a sazonalidade de regiões extremamente

sensíveis a variações ou mudanças climáticas, como a bacia amazônica e a bacia da Prata (SILVEIRA et al. 2011).

É importante salientar que não existe um modelo ideal, ou um que seja considerado como “melhor”. O que se recomenda fazer é analisar os resultados de uma série de modelos diferentes, que são cuidadosamente avaliados, com o intuito de explorar os efeitos de diferentes formulações.

Silveira et al. (2011) fizeram uma avaliação dos modelos globais do IPCC, a fim de verificar quais modelos conseguem representar bem os fenômenos meteorológicos sobre a América do Sul, especialmente sobre o Brasil. Os autores concluem que, de modo geral, os modelos globais do IPCC apresentam correlações estatísticas elevadas, em relação à climatologia observada (do período entre 1960 a 1990), mostrando que os modelos são capazes de capturar os padrões de variações sazonais. Porém, dentre os modelos analisados, os que mais se destacaram, de modo geral, foram os modelos GISS\_MODEL, CSIRO.MK3 e UKMO-HadCM3, sendo este último o que melhor se enquadra na região de estudo, conforme se apresenta na próxima seção.

#### 2.1.5.1 O modelo global UKMO-HadCM3

O modelo HadCM3 (*Hadley Centre Coupled Model Version 3*) foi desenvolvido em 1999 e foi o primeiro “modelo climático unificado”, ou seja, foi o primeiro modelo a não requerer um ajuste artificial nos fluxos de energia no oceano. Dessa forma, previne-se que o modelo faça projeções climáticas irreais conhecidos como “*drifts*” e passe a produzir uma boa simulação. Um teste foi feito para o modelo, fazendo-o simular um período de 1000 anos e no resultado não foi detectado nenhum tipo de *drifting* durante esse período da simulação. Essa técnica foi considerada, para a época, como um dos maiores avanços que esse modelo apresentou em relação aos outros (HADLEYCENTRE, 2012; *climate prediction*, 2012).

O modelo HadCM3 é composto por diversas partes ou componentes, que podem ser resumidas em três repartições principais, que são:

- Atmosfera - a componente atmosférica do modelo global simula todas as principais interações que ocorrem na alta e baixa atmosfera, possui 19 níveis na vertical com diferentes resoluções no sentido vertical. Sua resolução horizontal é a mesma aplicada para a superfície terrestre;
- Superfície Terrestre - a parte terrestre do globo foi dividida em uma grade regular com e uma resolução de 2.5° de latitude por 3.75° de longitude, que é equivalente a uma resolução de 417 km x 278 km no Equador, e 295 km x 278 km a 45° de latitude, lembrando que é a mesma resolução no sentido horizontal da atmosfera;
- Oceano - a componente do oceano é composta por 20 níveis de diferentes resoluções verticais, e diferentemente da atmosfera a sua resolução horizontal é de 1.25° x 1.25°. Nesta resolução espacial é possível representar, em detalhes, importantes fenômenos oceânicos (HADLEYCENTRE, 2012).

O modelo apresenta outras características já utilizadas em outros modelos como um esquema de radiação com seis a oito bandas espectrais para a radiação solar e de onda longa. Os efeitos radiativos de gases de efeito estufa assim como de CO<sub>2</sub>, vapor de água e ozônio são representados explicitamente (EDWARDS e SLINGO, 1996), e também incluem uma parametrização simples de aerossóis (CUSACK et al. 1998).

Um esquema de processos de superfície (COX et al. 1999) inclui a representação de ponto de congelamento e derretimento da umidade do solo, assim como de processos de escoamento superficial e profundo no solo. A formulação de evaporação inclui a dependência deste processo em relação à resistência de diminuição, à temperatura e à concentração de vapor d'água e de CO<sub>2</sub>.

O albedo da superfície é uma função da profundidade da neve, tipo de vegetação e também da temperatura sobre neve e gelo. Ele permite também a emissão, transporte e oxidação de compostos de enxofre, o que permite que os efeitos diretos e indiretos de sulfatos possam ser modelados nos cenários climáticos.

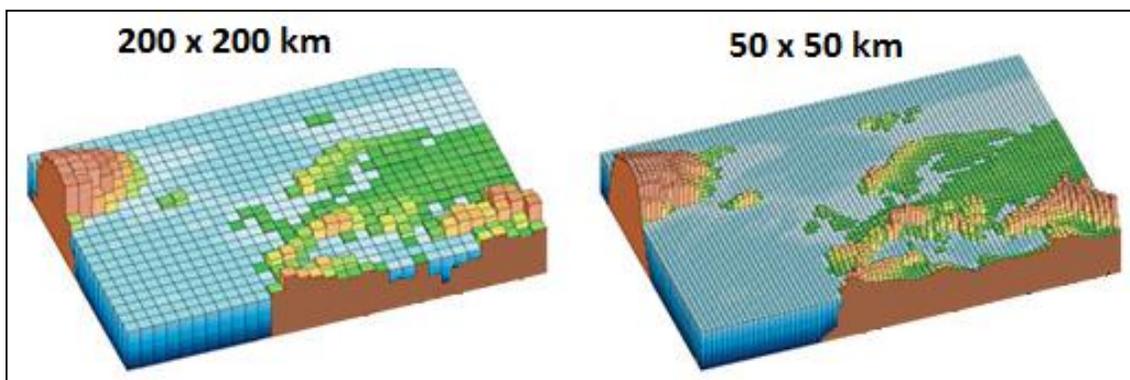
Mais referências e detalhes sobre os modelos HadCM3 podem ser encontradas em Gordon et al. (2000).

### 2.1.5.2 Modelos Regionais - Modelo Eta

Conforme mencionado anteriormente, o custo computacional para projeções climáticas com um modelo global com uma resolução fina é muito elevado. O clima regional pode ser controlado por fatores físicos, que podem ser de escala espacial bem menor. As características físicas como a topografia, tipo de vegetação, distribuição terra/água podem causar significativa influência no clima regional. Um exemplo disso se refere às brisas marítimas e às circulações atmosféricas induzidas por vales e montanhas, diferenças no uso do solo, forma da costa, dentre outras (HAY e CLARK, 2003; ROADS et al., 2003).

Uma alternativa criativa, que é desenvolvida atualmente, é o chamado "*downscaling*", que consiste em uma técnica de adensamento, na qual se utiliza um modelo atmosférico de resolução mais alta (modelo regional), alimentado nas fronteiras pelas condições produzidas pelo modelo global.

Analisando a Figura 2.10, percebe-se claramente uma melhora na representação do mapa da Europa, tanto no sentido das fronteiras ou limites entre o mar e a terra, como na topografia. No processo de *downscaling*, o modelo regional usa as condições de fronteira das células do modelo global (de resolução de 200x200 km), para gerar uma simulação com uma resolução maior (50x50 km), fazendo com que aquela região tenha uma representação mais detalhada e mais próxima do observado, ou real.



Fonte: WMO (2012).

Figura 2.10: Exemplos de aplicações da técnica de "*downscaling*" de modelos globais para a Europa e norte da África.

Com o intuito de melhorar cada vez mais a representação do clima e dos processos físicos para uma determinada região, os modelos regionais vêm se desenvolvendo cada vez mais nos últimos anos, por meio de metodologias diversas (GIORGI et al., 2004; JONES et al., 2004; MARENGO et al., 2009).

Existe uma série de vantagens práticas relacionadas aos modelos atmosféricos regionais (ROADS et al., 2003; KERR, 2004). Um dos principais benefícios se refere à possibilidade de aplicar o modelo em regiões específicas, na qual existam redes de coleta de dados com maior densidade, permitindo a validação dos modelos e o desenvolvimento de novas técnicas para assimilação de dados observados.

Ainda em 2004, Kerr (2004) já previa que, devido ao contínuo aumento na capacidade dos processamentos e a utilização de processos por meio de *clusters* (que tem um custo muito menor do que os supercomputadores), a tendência futura seria que cada região do país possuía um modelo atmosférico regional que seja adaptado às suas características e necessidades, possibilitando uma maior confiabilidade nas previsões ou projeções climáticas futuras, podendo diminuir um pouco as incertezas nas simulações dos modelos.

O INPE vem utilizando o modelo Eta, há alguns anos, como modelo de previsão de tempo e do clima sazonal. A versão climática sazonal do modelo Eta foi adaptada para executar integrações com intervalos de tempo decadal, com o foco no estudo de cenários de mudanças climáticas. O modelo Eta foi aninhado com o modelo global HadCM3, com uma resolução de 40 km na horizontal e com 38 camadas na vertical (CHOU et al. 2005).

De acordo com Chou et al. (2011), para a confecção das projeções climáticas futuras do modelo, a concentração de CO<sub>2</sub> foi mantida constante, dentro dos parâmetros do cenário A1B do IPCC (NAKICENOVIC et al., 2000). A partir desta definição do cenário de emissão de gases estufa, foi feita uma perturbação nos parâmetros do modelo, a fim de gerar os cenários ou membros diferentes dentro do modelo Eta. Essas perturbações nos parâmetros têm a mesma função dos cenários de emissões em outros modelos, ou seja, o modelo Eta simulará diferentes projeções climáticas futuras para cada caso.

Após a perturbação dos parâmetros do modelo Eta, foram gerados centenas de membros dentro do modelo. Dentre eles, foram escolhidos apenas três membros que apresentaram uma Alta, Média e Baixa sensibilidade (*High, Medium, Low*) na resposta da temperatura média global futura. Juntamente, foi

feito um membro sem nenhuma perturbação, caracterizado como Controle. Esses quatro membros fornecem as condições futuras de contorno para a condução de múltiplas realizações do modelo Eta. Para se estabelecer uma ligação ou verificação com os dados observados, foram simulados os dados para o período 1961 a 1990, representando o clima do presente (CHOU et al., 2011).

Os objetivos do trabalho de Chou et al. (2011) foram avaliar se nessas condições de *downscaling* o modelo regional tem capacidade de reproduzir o clima atual, estimar alguns erros e o espalhamento dos membros do conjunto. O principal período avaliado por Chou et al. (2011) foram os extremos, o verão (DJF) que é o período úmido, e o inverno (JJA) que é caracterizado como o período seco.

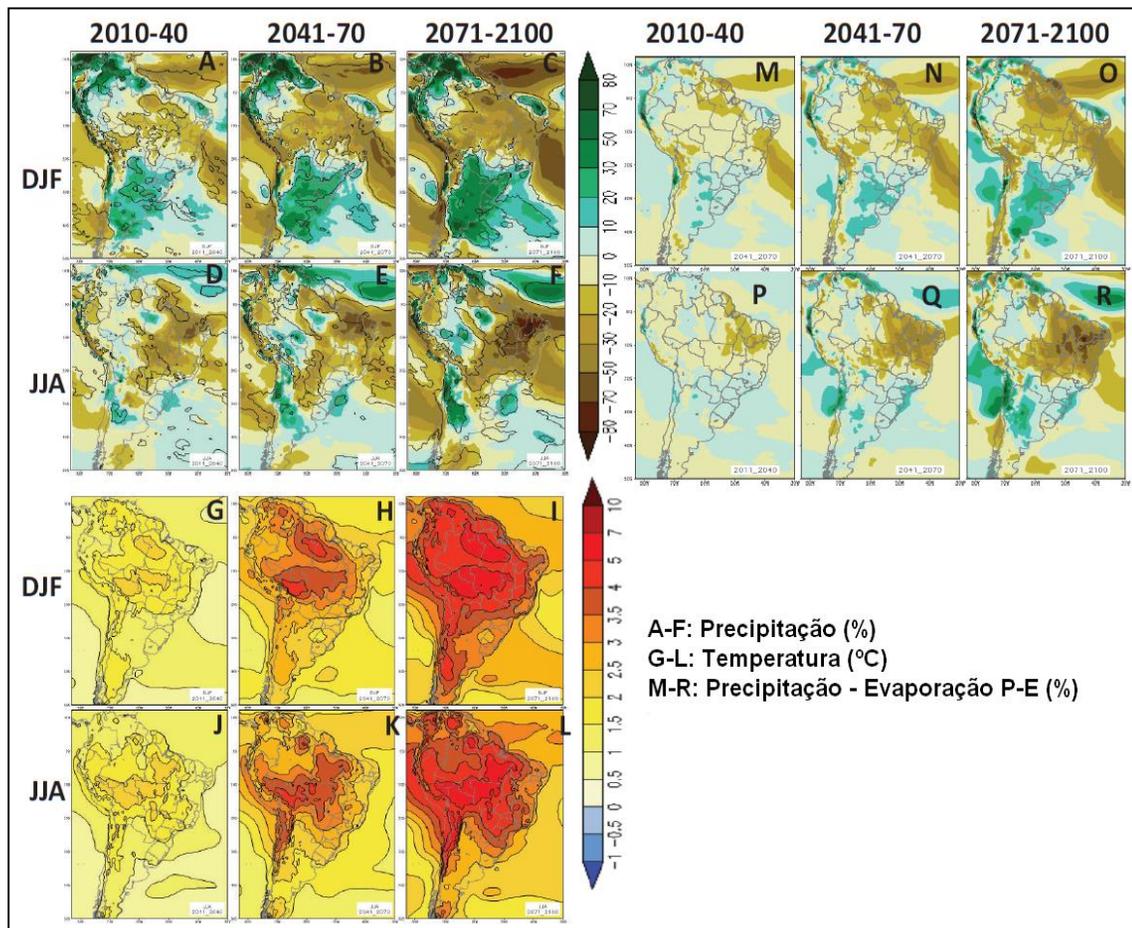
Chou et al. (2011) afirmam que tanto nas camadas superiores quanto nas inferiores da atmosfera, o modelo regional apresenta uma boa concordância com o modelo global, mostrando sua eficiência. Os dados da precipitação média e a temperatura são próximos aos valores observados. Chou et al. (2011) apontam que as vantagens dessa metodologia é o ganho significativo na representação da sazonalidade climática de grande escala, como o El Niño e La Niña.

O modelo Eta apresentou erros na determinação da precipitação e da temperatura parecidos com os que foram apresentados nos estudos anteriores, como uma subestimação da precipitação na Amazônia durante o período úmido ou verão, bem como em latitudes subtropicais como no norte da Argentina (CHOU et al. 2011).

Em outro experimento, Marengo et al. (2011b) fizeram um estudo avaliando as possíveis mudanças climáticas para os anos de 2011 a 2100, simuladas pelos quatro membros do modelo Eta, sob influência do cenário A1B do IPCC, para a América do Sul e para as três grandes bacias hidrográficas do Brasil (Amazônica, Paraná e São Francisco).

As conclusões de Marengo et al. (2011b) não são muito diferentes daquelas apresentadas em trabalhos de diferentes autores e modelos climáticos anteriores ao deles. Eles verificaram que as projeções futuras do modelo apontam para uma grande redução na precipitação das bacias Amazônica e do São Francisco, por volta de 40% a menos no final do século XX, e um aumento da precipitação na região da costa entre o Peru e Equador, chegando a um aumento de 30% no norte da Argentina. Todas essas mudanças se tornam mais intensas após o ano de 2040.

A Figura 2.11 apresenta a relação (porcentagem) entre modelo Eta para o futuro e o período de 1961 a 1990 para as precipitações simuladas (A – F), pela diferença entre a evaporação e a precipitação (M – R) e variação da temperatura futura em relação à do clima do presente em °C para toda a América do Sul (G – L).



Fonte: Modificado de Marengo et al. (2011b).

Figura 2.11: Simulações pelo modelo Eta para o cenário do IPCC AIB na América do Sul.

Conforme pode ser observado nas três variáveis avaliadas, a diferença entre as projeções em todos os triênios e os dados observados aumentaram ao longo do tempo.

## 2.2 Metodologias para avaliação de tendências climáticas

Os estudos visando à análise das séries climáticas devem ser fundamentados por métodos consistentes para que tenham validade e sejam aceitos no meio científico. Os testes estatísticos que analisam a relação de ordem entre o tempo cronológico e os valores de uma variável meteorológica, caracterizando uma série temporal, podem fornecer informações importantes para a investigação de tendências de ordem climática utilizadas em pesquisas que têm como objetivo comparar condições experimentais e fornecer respaldo. Esses testes podem ser divididos em paramétricos e não paramétricos.

Nos testes paramétricos, os valores da variável estudada devem ter distribuição normal ou aproximação normal. Já os testes não paramétricos, também chamados por testes de distribuição livre, não têm exigências quanto ao conhecimento da distribuição da variável na população.

Segundo Cândido (2003), esses testes não exigem uma distribuição de probabilidade específica e têm suas estatísticas de decisão com base em características indiretas dos dados originais, tais como sinal em função de um valor de referência. Ele recomenda a utilização desses para identificação da heterogeneidade e dependência da série.

Barnett e Turkman (apud Piao et al.,2008) realizaram intensa pesquisa bibliográfica e descrevem que 65% dos testes realizados em dados ambientais são simples testes de significância, 25% do tratamento de dados são realizados com análise multivariada de dados e apenas 10% do tratamento de dados são desenvolvidos com outras ferramentas matemáticas, como testes de tendências temporais, o que ressalta a importância deste trabalho, que utiliza esses testes para avaliação do comportamento das séries hidrológicas.

Na análise de tendência temporal de uma variável hidrológica objetiva-se diagnosticar o comportamento, indicando se houve aumento ou redução nos índices ao longo do tempo. Desse modo, essa seção visa apresentar os principais métodos estatísticos aplicados ao problema de tendências, bem como a identificação do ponto de mudança, com objetivo de ser dado um respaldo técnico aos resultados encontrados.

Blain (2009) justifica a adoção de investigações paramétricas e não paramétricas baseada nas afirmações de Dale (1968) e Sansigolo e Nery (2000), relativas ao maior embasamento estatístico da descrição climática quando são utilizados modelos teóricos. Dessa forma, pode-se inferir que, para se verificar evidências de alterações climáticas, deve ser feito o ajuste das séries meteorológicas a uma distribuição teórica. A análise dessas possíveis mudanças seria realizada por meio do estudo dos parâmetros das distribuições relativas a cada amostra dessa série, diminuindo, com isso, a probabilidade de que as diferenças entre cada subperíodo sejam atribuídas a deficiências no tamanho da amostra (falha na descrição climática da região).

Em contrapartida, segundo Frei e Schar (2000), análises de tendências em longas séries meteorológicas confrontam-se com a dificuldade fundamental de que as variações estocásticas limitam a confiabilidade com que possíveis tendências podem ser detectadas.

Esses autores especificam os dois tipos de erro que podem ocorrer:

- a) indicação de tendências climáticas, quando há apenas flutuações essencialmente controladas pelas variações estocásticas (erro tipo I);
- b) uma real tendência climática não é identificada por estar “encoberta” por flutuações estocásticas de pequenas escalas temporais (erro tipo II).

Segundo Frei e Schar (2000), esses erros estão presentes em todo e qualquer tipo de análise de mudanças climáticas. No presente caso, apesar da suavização causada pelo ajuste das distribuições empíricas à distribuição normal (DN) diminuir, a probabilidade do erro tipo I aumenta, obviamente, a do tipo II. O autor finaliza, afirmando que se devem analisar possíveis alterações climáticas considerando testes não paramétricos.

A aplicação de um determinado teste está diretamente relacionada ao tipo de análise que está sendo elaborada. Blain (2009) afirma que a detecção de alterações nos padrões de clima pode ser confirmada por meio de métodos estatísticos e menciona diversos trabalhos da comunidade científica internacional que evidenciam essas análises.

Dentre os métodos mais recomendados para verificação do comportamento dos dados climáticos, têm-se a análise de regressão e a avaliação por meio de análises não paramétricas por meio dos testes de Mann-Kendall e de Pettitt, conforme Blain (2010a) sendo que alguns autores também recomendam a aplicação do teste de Run e de Spearman.

O Teste de Mann-Kendall, proposto inicialmente por Sneyers (1975), considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples).

Blain (2009) descreve o método considerando uma série temporal de  $X_i$  de  $N$  termos ( $1 \leq i \leq N$ ). O teste consiste na soma  $t_n$  do número de termos  $m_i$  da série, relativo ao valor  $X_i$  cujos termos precedentes ( $j < i$ ) são inferiores ao mesmo ( $X_j < X_i$ ). No Capítulo 3, esse teste é descrito de forma mais detalhada.

A hipótese de nulidade é que não há mudança climática considerando um nível  $\alpha$  de probabilidade de 5% entre os valores da amostra e da população desta, ou seja, o valor absoluto da estatística da distribuição normal padrão  $Z$  deverá ser maior que  $Z_{1-\alpha/2}$ , ou seja,  $Z > 1,95$ . Caso isso ocorra, significa que existe tendência significativa na série e o sinal de  $S$  indicará se a tendência é positiva ( $S > 0$ ) ou negativa ( $S < 0$ ). Entretanto, Blain (2010a) afirma que a presença de autocorrelação positiva pode representar uma falsa tendência de elevação, sendo que isso pode ocorrer para valores negativos. Esse teste é útil porque leva em conta o fato de que pode haver variações sazonais nos dados; entretanto, não é considerado o valor dessa variação.

O Teste de Pettitt (Moraes *et. al.*, 1995; Pettitt, 1979) utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney, no qual se verifica se duas amostras  $X_1, L, X_t$  e  $X_{t+1}, L, X_T$  são da mesma população. A estatística  $U_{t,T}$  faz uma contagem do número de vezes que um membro da primeira amostra é maior que o membro da segunda. Esse teste permite a localização do ponto em que ocorre a mudança brusca em uma série temporal, além de calcular o nível de significância estatística, sem se conhecer previamente o ponto no tempo no qual ela ocorre.

Já o método de Spearman, conforme apresentado por Alexandre *et al.* (2010) permite avaliar o coeficiente de correlação  $r$  entre duas variáveis  $X$  e  $Y$  e mede o grau de associação da variabilidade

espacial obtida em diferentes tempos. Neste trabalho, em que se pretende avaliar a disposição existente na série de dados hidrológicos, a variável X representa o conjunto de dados hidrológicos em sua sequência cronológica, e a variável Y, o ordenamento em ordem crescente.

De acordo com Back (2001), o teste Run é um teste não paramétrico usado para avaliar se uma série ocorre aleatoriamente. Consiste em realizar a contagem do número de oscilações dos valores acima e abaixo da mediana, numa série de dados naturalmente ordenada. O número de oscilações é chamado de Run, e deve-se testar se o valor observado está dentro da faixa de distribuição considerada normal. Um valor alto de Run indica muitas oscilações, e valores baixos indicam um desvio em relação à mediana durante o período de registros.

Ainda em Back (2001), a análise de regressão pode ser utilizada para indicar alterações climáticas por meio do teste de significância do coeficiente angular. Considerando a equação da reta do tipo: " $Y = ax + b$ ", o teste consiste em determinar o intervalo de confiança do coeficiente a, sendo que se esse intervalo não inclui o valor zero, a tendência é significativa, sendo que a visualização gráfica consegue representar de modo satisfatório o comportamento dos dados.

De forma a complementar a validação dos demais testes, a técnica da média móvel é utilizada para analisar o valor médio de uma amostra num determinado período. O principal objetivo da média móvel é fornecer o valor médio da cotação dentro de um determinado período. A expressão "janela móvel" diz respeito à média aritmética de um determinado número (n) das observações mais recentes. À medida que se realizam novas observações, abandonam-se as observações mais antigas, assim, para cada valor incluído no cálculo da média, o valor mais antigo é excluído.

A representação da curva de flutuação anual é dada pela curva das diferenças totalizadas em relação à média. Nesse caso, a soma das diferenças de cada valor para a média representa o quanto as observações variam a partir da média, ou seja, a soma algébrica dos desvios da média é igual a zero. Esse método permite boa visualização do comportamento dos dados, por meio de análise gráfica, que é gerado pelo somatório dos valores dos totais anuais descontando-se o valor da média.

Os procedimentos supracitados foram aplicados a diversos trabalhos para verificação de tendências climáticas de precipitação, vazão, temperatura ambiente e de mínima de relva, dentre outras

variáveis, nas mais variadas regiões com base em séries diárias, mensais, anuais, trimestrais, máxima diária anual, etc., conforme o foco da pesquisa.

O trabalho de Blain (2010b) aplicou o teste de Mann-Kendall, com o objetivo de detectar tendências climáticas nas séries mensais de precipitação pluvial em oito municípios do estado de São Paulo, no período de 1948 a 2007, sendo que em Monte Alegre do Sul foi observada a presença de tendências de elevação nas séries mensais de setembro e maio. As estações de Campinas e Ribeirão Preto indicaram a existência de tendências de elevação nas séries relativas ao mês de maio. Na série de Jundiaí foi verificada tendência de elevação apenas quando os totais anuais foram analisados. Nos municípios de Cordeirópolis e Pindorama nenhuma tendência significativa foi observada. Já para a localidade de Ubatuba foi detectada uma pequena tendência de queda para agosto.

Para os mesmos municípios e mesmo espaço amostral, Blain e Morais (2011) aplicaram as séries de valores máximos diários de precipitação pluvial, utilizando o ajuste dessas distribuições empíricas a diferentes funções de densidade de probabilidade.

No teste de aderência Kolmogorov-Smirnov/Lilliefors, os gráficos percentil-percentil e quantil-quantil indicaram bom ajuste dessa variável meteorológica à distribuição geral dos valores extremos em todos os municípios, com exceção de Pindorama que foi detectada tendência de elevação; já as análises de Fourier e de ondaletas não indicaram periodicidades em nenhum dos postos analisados. Com base nos testes Run, Pettitt e Mann-Kendall, não foram verificadas tendência dos dados climáticos.

A variação mensal da temperatura máxima e mínima em seis municípios do estado de São Paulo foi estudada por Blain (2011), por meio de métodos paramétricos e não paramétricos (Mann-Kendall e de Pettitt). Segundo o autor, as alterações observadas nas séries de temperaturas máximas são inferiores às observadas nas temperaturas mínimas, sendo que dentre todas as localidades analisadas, Ubatuba foi a que apresentou tendências de elevação mais significativas nos dados de temperatura do ar, sendo que em Abril foram verificados os indícios mais significativos de elevação nos valores mensais da Tmax e da Tmin, e Setembro mostrou-se o menos sujeito à variação.

Já no trabalho de Blain e Lulu (2011), foram analisados os valores anuais absolutos de temperatura máxima e mínima do ar, para os mesmos municípios do estado de São Paulo, só que, nesse

caso, também foi aplicado o teste não paramétrico de Run, sendo que os autores identificaram uma tendência pouco significativa das temperaturas mínimas apenas em Ubatuba, pois nas demais localidades não foram identificadas alterações.

Ainda estudando temperatura, Blain et al. (2009) utilizaram o teste de Mann-Kendall, que não indicou tendências concomitantes nos dados anuais nos mesmos seis municípios do estado de São Paulo.

No trabalho de análise estatística para identificar tendências anuais da temperatura e precipitação pluvial da estação meteorológica de Urussanga, a série histórica de 1924 a 1998 de precipitação pluvial e temperatura média do ar à superfície, Back (2001) afirma que a análise de regressão, o teste de Pettitt e o teste de Mann-Kendall apresentam concordância entre seus resultados e podem ser utilizados na identificação de tendências de séries temporais, enquanto o teste de Run não se mostrou adequado na identificação de tendências e mudanças climáticas.

Na pesquisa de Back e Vieira (2009), foram analisadas as séries históricas de precipitação mensal para o período de 1924 a 2008 e a série de dados diários no período de 1959-2008 da estação meteorológica de Urussanga - SC, nas quais foram empregados a análise de regressão e os testes de Mann-Kendall.

Pettitt e Run indicaram tendência significativa no aumento da precipitação anual; entretanto, a tendência de mudança da série de precipitação pelo teste de Mann-Kendall ocorreu no ano de 1980, e pelo teste de Pettitt em 1972.

A utilização de regressão linear, juntamente com os testes de Mann-Kendall e Pettitt, foi utilizada para identificar as mudanças temporais no desempenho e tendência de precipitação na bacia hidrográfica de Atibainha nos períodos de estiagem em função das alterações na paisagem, sendo observado que as diminuições das vazões na estiagem não estão diretamente relacionadas às mudanças de uso das terras via aumento das taxas de escoamento superficial e subsuperficial.

Pereira e Teixeira Filho (2011) concluem que as diminuições nos totais de chuvas parecem ser o principal fator encontrado para explicar as alterações nas vazões durante a estiagem e recomendam estudar mais uso e ocupação do solo.

Já Moraes et al. (1997), com intuito de fazer um estudo científico para respaldar as hipóteses de alterações da vazão dos rios Atibaia, Jaguari e Piracicaba, devido à construção do sistema Cantareira que abastece grande parte da região metropolitana de São Paulo, aplicaram os teste de Mann-Kendall e Pettitt, nas séries de precipitação e dos cursos d'água no período de 1930 a 1995. Nesse estudo, os autores concluíram que uma diminuição de vazão nesses rios coincide com o período de implantação do sistema de transposição, provocando uma diminuição significativa da vazão no período estudado. Entretanto, como houve um ligeiro aumento na precipitação, essas alterações das vazões podem-se associar mais a ações antrópicas do que uma possível alteração do clima.

A bacia do rio Piracicaba também foi estudada por Groppo et al. (2001); entretanto, o número de postos utilizados foi maior e a abrangência da série foi de 1947 a 1996, que os observados no trabalho de Moraes et al. (1997). Contudo, o resultado encontrado foi o mesmo, no qual se obteve 52%, 24% e 21% de decréscimo de vazão para os rios Jaguari, Atibaia e Piracicaba após a implantação do sistema Cantareira, e na maioria dos postos de precipitação analisados houve uma tendência de aumento. Todavia, os autores não associam esta variação a causas de origem antrópica, uma vez que depende de fenômenos que não podem ser atribuídos somente a mudanças locais.

O comportamento hídrico do rio Piracicaba (1944 – 1997) também foi estudado no trabalho de Mortatti et al. (2004) juntamente com o rio Tietê (1965 – 1996), com o auxílio dos testes de Mann-Kendall e Pettitt, sendo que em ambos os casos foi detectada uma ruptura na séries de vazões no início da década de 80. Para o caso de precipitação, os resultados para a bacia do rio Piracicaba indicaram leve tendência de aumento, confirmando os resultados dos estudos descritos acima. Já para a bacia do rio Tietê este comportamento também foi evidenciado só que de forma mais significativa.

Com o objetivo de analisar a tendência nos parâmetros de qualidade de água na bacia do rio Piracicaba, Groppo et al. (2006) utilizaram os testes de Mann-Kendall e Pettitt para analisar o comportamento de nove postos de monitoramento, entre 1979 e 2001, sendo observada uma degradação da qualidade da água, representada pelas tendências de aumento nos parâmetros (DBO, nitrogênios, fósforo total e cloreto) e decaimento de (OD).

Ainda analisando os parâmetros físico-químicos de qualidade da água, Piao et al. (2008) utilizaram a média móvel para avaliar as séries temporais em pontos previamente selecionados e coletados

na bacia hidrográfica do rio Atibaia entre outubro de 1999 e março de 2007, sendo observado que após a utilização da metodologia da janela móvel, as novas séries foram suavizadas e enquadradas conforme a resolução Conama 303 de 2002.

Além desses trabalhos, Gossens e Berger (1986) afirmam que o teste de Mann-Kendall é o método mais apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas, permitindo também a detecção e localização aproximada do ponto de início de uma tendência.

Os testes de Mann-Kendall e Pettitt também foram utilizados para associar o aumento da produtividade nas lavouras de milho e soja para os estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná com o Zoneamento de Riscos Climáticos no Brasil que surgiu em 1996, conforme o trabalho de Ultramare e Assad (2009).

Já Rodrigues e Santos (2007) avaliaram a tendência climática trimestral nas séries de precipitação em Araguari - MG entre 1975 e 2005, sendo que os resultados indicam que somente o primeiro trimestre apresentou uma tendência não significativa, o segundo e quarto apresentaram uma tendência negativa, e em relação ao terceiro trimestre, o teste de Mann-Kendall apresentou tendência negativa.

Esse mesmo teste foi aplicado por Fachine e Galvínio (2010) para analisar a variação dos dados anuais de precipitação nos anos de El Niño de quinze postos localizados na bacia hidrográfica do rio Pontal em Pernambuco, sendo observada leve redução, porém não significativa dos dados de precipitação.

Para verificar a relação entre o desmatamento da Amazônia e sua consequência no balanço hídrico, o trabalho de Paiva e Clake (1995) aplicou o teste de Mann-Kendall e de regressão linear para detecção de tendência em 48 estações pluviométricas da bacia Amazônica, sendo observado que as tendências positivas e negativas ocorreram com igual frequência sobre toda a bacia. A tendência positiva ocorreu de forma mais espalhada na bacia, enquanto que a tendência negativa aconteceu em local de maior povoamento e desmatamento maior. Entretanto, as estações que apresentaram essa tendência, estão situadas mais próximas aos rios que no interior da floresta, o que pode ter influenciado no resultado. Além disso, a maioria dos postos possui poucos dados disponíveis, os quais influenciam na análise. Deve

ser mencionado que os autores realizaram uma padronização das séries removendo as subtrações médias para depois aplicar os métodos.

Os mesmos testes foram aplicados no trabalho de Feitosa (2010) que fez uma análise da alteração do clima em Teresina - PI, decorrente da urbanização e supressão de área verde, durante 33 anos (1977 – 2010), concluindo que houve aumento de temperatura mínima e média do ar, sendo maior no período do “b-r-o-bró” (set-out-nov-dez), tendo outubro como o mês mais quente do ano, o que pode ter relação com a supressão de áreas arborizadas.

A autora tentou relacionar o aumento de temperatura média com uma possível redução de umidade relativa do ar; entretanto, a existência de rios perenes cortando o município e o aumento de superfícies de água pode ter contribuído para manter inalterada a umidade relativa, o que segundo a autora, evidencia que o processo de expansão urbana não teve influência no regime de precipitação pluviométrica de Teresina.

Do ponto de vista global, Blain (2011) menciona os trabalhos de Karl et al. (1999), que utilizam dados de diversas partes do globo para constatar uma tendência global de elevação no número de dias “excessivamente quentes” (*extremely hot days*) observados em cada ano.

Alexander et al. (2006) analisando dados globais extremos de temperatura do ar e precipitação pluvial, na escala diária, identificaram, em 70% das regiões analisadas, significativa elevação nas temperaturas noturnas.

Victória et al. (1998) observaram tendências de elevação da ordem de 0,56 °C/século. Segundo esses autores, essa elevação teve início entre o fim da década de 1960 e começo dos anos 1970.

Já o teste de Spearman, além de ser aplicado a diversos estudos sobre o comportamento hidrológico, foi empregado no trabalho de Avila et al. (2010) para avaliar o grau de correlação da variável espacial do conteúdo de água no solo sob diferentes tempos de amostragem em uma bacia hidrográfica experimental da Serra da Mantiqueira em Minas Gerais, sob diferentes usos do solo, avaliando-se o padrão de estabilidade para os períodos úmido e seco, visando a identificar pontos representativos para implementação do monitoramento contínuo do conteúdo de água no solo, com reduzido esforço amostral e

consequentemente, a um custo reduzido, sendo observado que as características de cada área devem ser consideradas particularmente para o monitoramento.

Contudo, deve-se tomar cuidado ao se fazer o comparativo entre alguns métodos. Como exemplo, tem-se o trabalho de Alexandre et al. (2010), o qual objetivou detectar tendências do regime de chuvas na Região Metropolitana de Belo Horizonte, onde foram estudados dados de 20 estações, com séries de 51 a 149 anos, em análises de totais anuais, totais trimestrais, totais semestrais e totais mensais máximos anuais e constataram que, em algumas situações, a inclinação da reta de regressão linear de uma determinada série pluviométrica era maior do que a de outra estação.

No entanto, os testes estatísticos indicaram tendência significativa na série com menor coeficiente angular e não apontaram significância estatística na amostra cuja inclinação da reta de regressão era maior. Os autores concluem o trabalho afirmando que os estudos científicos são de grande importância; contudo, deve-se tomar cuidado ao afirmar que as ocorrências de eventos extremos e catastróficos são, de fato, evidências de mudanças do clima.

Dentre as pesquisas que abrangeram a bacia de Furnas, objeto deste estudo, Santana et al. (2011), buscando melhor entendimento do comportamento da vazão, utilizaram o teste de Mann-Kendall para avaliar a tendência nas séries contribuintes às bacias.

Os autores concluíram que a bacia do rio Sapucaí foi a que registrou a maior quantidade de postos com tendência de aumento das vazões médias, sendo que as principais diferenças nas séries ocorrem ao longo dos últimos 30 anos, sendo que os meses com maiores ocorrências de tendências foram os de agosto e setembro, enquanto que a bacia do rio das Mortes foi a que registrou o maior número de postos com tendência de diminuição; entretanto, não foi possível concluir que essas alterações estão diretamente associadas a alterações no regime das chuvas.

Já o trabalho de Muller et al. (1998), contemplando as bacias hidrográficas dos rios afluentes até a Usina Hidroelétrica de Itaipu, com objetivo de analisar a estacionariedade de séries de vazões e precipitações, com base em diferentes técnicas estatísticas, constatou que houve aumentos significativos de vazões e precipitações médias após 1970.

Os autores concluíram que o aumento de precipitação pode justificar o aumento de vazões nas regiões situadas a montante da área de estudo, e para as bacias situadas mais a jusante, o aumento de vazão é incompatível com o aumento de precipitação, indicando que outros fatores interferem no processo.

Desse modo, o fenômeno do aumento de vazão decorre de efeitos conjuntos do aumento da precipitação (que pode ser transitório), diminuição da evapotranspiração provocada pela retirada da mata nativa e aumento da infiltração da chuva, facilitada pelo adequado manejo do solo. Neste estudo, as análises foram realizadas por meio de diversas técnicas estatísticas sem considerar dados fisiógrafos da bacia, desmatamento, uso e ocupação do solo e foram realizados preenchimentos de falhas, mensalmente.

### 2.3 Modelos Hidrológicos de Transformação Chuva-Vazão

Segundo Chiari et al. (2007), o modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar os processos de transformação chuva-vazão em uma bacia hidrográfica e prever condições futuras, a partir de previsões meteorológicas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização e dos objetivos a serem alcançados.

Kaiser e Porto (2005) afirmam que a distribuição espacial da chuva é um assunto largamente estudado, com diferentes abordagens, em função das mais variadas aplicações da hidrologia. O conhecimento mais detalhado dessa distribuição traz benefícios a todas as áreas da hidrologia que tratam da circulação de água na terra. Para a modelagem hidrológica de transformação chuva-vazão, sabe-se que a forma como uma tormenta se desloca sobre uma bacia hidrográfica tem impacto na vazão final no rio. No caso de modelos hidrológicos distribuídos de embasamento físico, é fundamental que se trabalhe com a precipitação de forma espacializada, pois o modelo avalia todos os processos envolvidos na transformação de chuva em vazão, envolvendo armazenamento da água no solo, geração dos escoamentos superficial, subsuperficial e básico.

Segundo os autores, a dificuldade de trabalhar com este tipo de modelo está associada à dificuldade de obtenção de parâmetros espaciais e da indisponibilidade de informações sobre a distribuição espaço-temporal do dado de entrada: a chuva. Esse “problema” se deve à forma usual de medida da precipitação ser por meio de pluviômetros, que fornecem uma medida diária e de forma menos frequente, de pluviógrafos, que registram a distribuição temporal da chuva, sendo que ambas medidas são pontuais. A mensuração pelo sensoriamento remoto, radares meteorológicos e imagens de satélite proporciona uma avaliação de sua distribuição espacial, pois são instrumentos correntemente utilizados em atividades meteorológicas. A quantificação de chuva a partir de satélite é muito recente. Já o radar, que teve seu uso intensificado após a Segunda Guerra Mundial, apresenta um histórico de pesquisas na quantificação de chuva e seu relacionamento com os dados pluviométricos.

Os estudos de distribuição espacial de chuva apresentam uma dificuldade peculiar: o desconhecimento do dado real, isto é, a impossibilidade de registro da distribuição da chuva na superfície do solo. Desta forma, a maioria dos trabalhos adota uma verdade, geralmente, o dado do pluviômetro aliado a alguma hipótese de distribuição espacial. Uma forma de contornar a ausência do dado real é a comparação dos resultados da aplicação dos campos de chuva em modelos hidrológicos distribuídos com vazões medidas.

Deste modo, dentre as variáveis do ciclo hidrológico, a vazão é uma das componentes de maior importância; sua mensuração é essencial para fazer um balanço entre oferta e demanda, sendo importante para a busca do desenvolvimento sustentável de uma sociedade.

Assim, a utilização de modelos hidrológicos surge como instrumento capaz de fornecer informações distribuídas no espaço e no tempo das variáveis hidrológicas. Em seu trabalho, Tucci (2002) descreve que a previsão de vazão é um desafio a ser utilizado para o gerenciamento dos recursos hídricos numa bacia.

Segundo Collischonn et al. (2005), os modelos hidrológicos se valem do fato que séries de chuva em geral existem em maior número e são mais extensas do que séries de vazão para preencher, estender e gerar séries de vazões. Entretanto, o autor afirma que a baixa densidade e qualidade das informações de postos pluviométricos têm sido o fator determinante na incerteza dos resultados de diversos modelos hidrológicos que têm sido aplicados no país.

A aplicação de modelo chuva-vazão tem grande aplicabilidade para a estimativa de cheias, níveis de navegação, disponibilidade hídrica, irrigação e produção de energia. Esses são alguns usos conhecidos para a previsão antecipada da vazão numa bacia hidrográfica. Nesses casos, a essência é estimar a vazão com alguma antecedência.

Segundo Paca (2008), existe o desafio de continuar desenvolvendo relações físicas entre os parâmetros dos modelos chuva-vazão e acessar a capacidade desses modelos na produção de vazões regionalizadas. Paca (2008) também sugere o uso de modelos concentrados, como foi o emprego do modelo SMAP em sua dissertação, modelos distribuídos, e dados de sensoriamento remoto das bacias pouco ou não monitoradas, que também permitam melhor assimilação dos dados de natureza espacial, como foi o caso do dado de chuva obtido via *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) examinado, em sua dissertação, em especial na região Norte do Brasil e na Amazônia, ainda bastante carentes de estudos dessa natureza.

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é baseado em um método que considera a umidade do solo, como o próprio nome remete, procura representar a relação não linear entre precipitação sobre a bacia e vazão na sua seção exutórica por meio do balanço hídrico nas camadas da fase terrestre do ciclo hidrológico. Por conseguinte, como todo modelo matemático aplicado em engenharia, realiza simplificações diversas, oriundas de um desconhecimento perfeito do sistema que se tenta modelar.

Oliveira et al. (2008) observaram que o impacto do uso de vazões sintéticas em substituição às vazões observadas foi considerado significativo estatisticamente, quando se estimaram as vazões máxima, média e mínimas. Porém, para fins de utilização hidrológica, esses impactos podem ser considerados inexpressivos para a estimativa das vazões máxima e média, e pouco expressiva para as vazões mínimas, não havendo uma relação linear entre a magnitude do impacto e a área de drenagem das sub-bacias estudadas.

Paz et al. (2005) afirmam que existe crescente interesse pela hidrologia e pela modelagem hidrológica de grandes bacias, motivado por estudos envolvendo mudanças climáticas, previsão hidrológica, impacto de modificações de uso e ocupação do solo, etc. Tais modelos dividem a bacia

estudada em células quadradas e têm como um dos planos de informação de entrada as direções de fluxo em cada célula, indicando para qual célula vizinha ocorre o escoamento.

A modelagem hidrológica distribuída de grandes bacias (áreas de drenagem superiores a 10.000 km<sup>2</sup>) é uma área relativamente recente da hidrologia, mas que vem se desenvolvendo intensamente. A motivação reside, principalmente, nos estudos acerca das mudanças climáticas, impacto das modificações de uso do solo e de previsão de vazões. Nesse sentido, foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) que já foi aplicado a diversas bacias brasileiras (COLLISCHONN, 2001).

O modelo hidrológico chuva-vazão utilizado neste trabalho é o modelo hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH), o qual foi desenvolvido por Collischonn (2001), com base na estrutura do modelo LARSIM e com algumas adaptações do modelo VIC-2L.

O modelo MGB-IPH divide a bacia em células regulares (5 a 20 km). No interior de cada célula, considera-se a variabilidade de características físicas, como a cobertura vegetal e os tipos de solo, sendo que o intervalo de tempo de cálculo é diário ou horário. Segundo Collischonn (2001), a aplicação desse modelo utilizou a resolução espacial a partir de células de 10 x 10 km e 0,1 x 0,1 graus.

O autor afirma que o MGB vem preencher um espaço intermediário entre os modelos de transformação chuva-vazão, adaptados para pequenas bacias, e os modelos de circulação global, de grande escala. O modelo tem sido usado para previsão, estudo de disponibilidade hídrica, gerenciamento de recursos hídricos e, em menor escala, avaliação de impactos de mudança de uso do solo e mudanças climáticas.

No estudo aplicado à bacia do Rio São Francisco, Silva (2005) verificou deficiências importantes de dados pluviométricos, principalmente, nas regiões semiáridas do médio e baixo São Francisco. Como conclusão, o autor verificou que existem deficiências importantes nas séries de vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos e que uma possível aplicação do modelo é a utilização das simulações para detectar e corrigir inconsistências nas séries de vazões naturais diárias.

Collischonn et al. (2007) empregaram o MGB utilizando dados de chuva observada, mostrando bons resultados tanto na vazão incremental total como na vazão observada em alguns dos principais afluentes do rio Paranaíba. A aplicação do modelo hidrológico para previsão, utilizando chuvas previstas pelo modelo Eta em um período de testes, resultou em um erro médio absoluto de 113 m<sup>3</sup>/s e em um erro relativo médio de 10,8 %. Os autores concluíram que os resultados indicam que a inclusão de previsões quantitativas de chuva poderá ter um impacto significativo na redução dos erros da previsão de vazão realizada operacionalmente pelas entidades e empresas do setor elétrico na referida bacia de estudo.

Collischonn et al. (2011) fizeram adaptações ao modelo MGB-IPH, por meio de uma metodologia de divisão da bacia em minibacias e aplicaram à bacia do rio Quaraí, localizado na região de fronteira entre o Brasil e o Uruguai, com o objetivo de avaliar o balanço hídrico, considerando a influência de retiradas de água para irrigação de arroz e a presença ou ausência de pequenos reservatórios. Os resultados mostraram que a demanda de água supera a disponibilidade na bacia, e que as retiradas de água diretamente dos rios têm um impacto maior do que a retirada de água dos açudes na disponibilidade hídrica de forma geral. Além disso, os autores concluíram que a discretização adotada em forma de minibacias mostrou ter vantagens em relação à discretização tradicional, baseada em células regulares quadradas.

Na bacia do Rio Grande, o MGB foi alimentado pelo modelo de circulação global HadCM3 por Nóbrega et al. (2011), para identificar possíveis impactos das mudanças climáticas na bacia, sendo identificadas incertezas nas projeções das vazões do rio, que podem variar de -28% a +13%, considerando 2°C de cenário de aquecimento. No entanto, os autores afirmam que essa incerteza está mais associada à escolha do MGB.

## 2.4 Sistema Elétrico Brasileiro

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2013), entre 2003 e 2004 o governo federal lançou as bases de um novo modelo para o Setor Elétrico Brasileiro (SEB), sustentado pelas Leis nº 10.847 e 10.848, de 15 de março de 2004, e pelo Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Em termos institucionais, o novo modelo definiu a criação de uma entidade responsável pelo planejamento do setor

elétrico em longo prazo: a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), uma instituição com a função de avaliar permanentemente a segurança do suprimento de energia elétrica, o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) e uma instituição para dar continuidade às atividades do Mercado Atacadista de Energia (MAE), relativas à comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Outras alterações importantes incluem a definição do exercício do Poder Concedente ao Ministério de Minas e Energia (MME) e a ampliação da autonomia do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

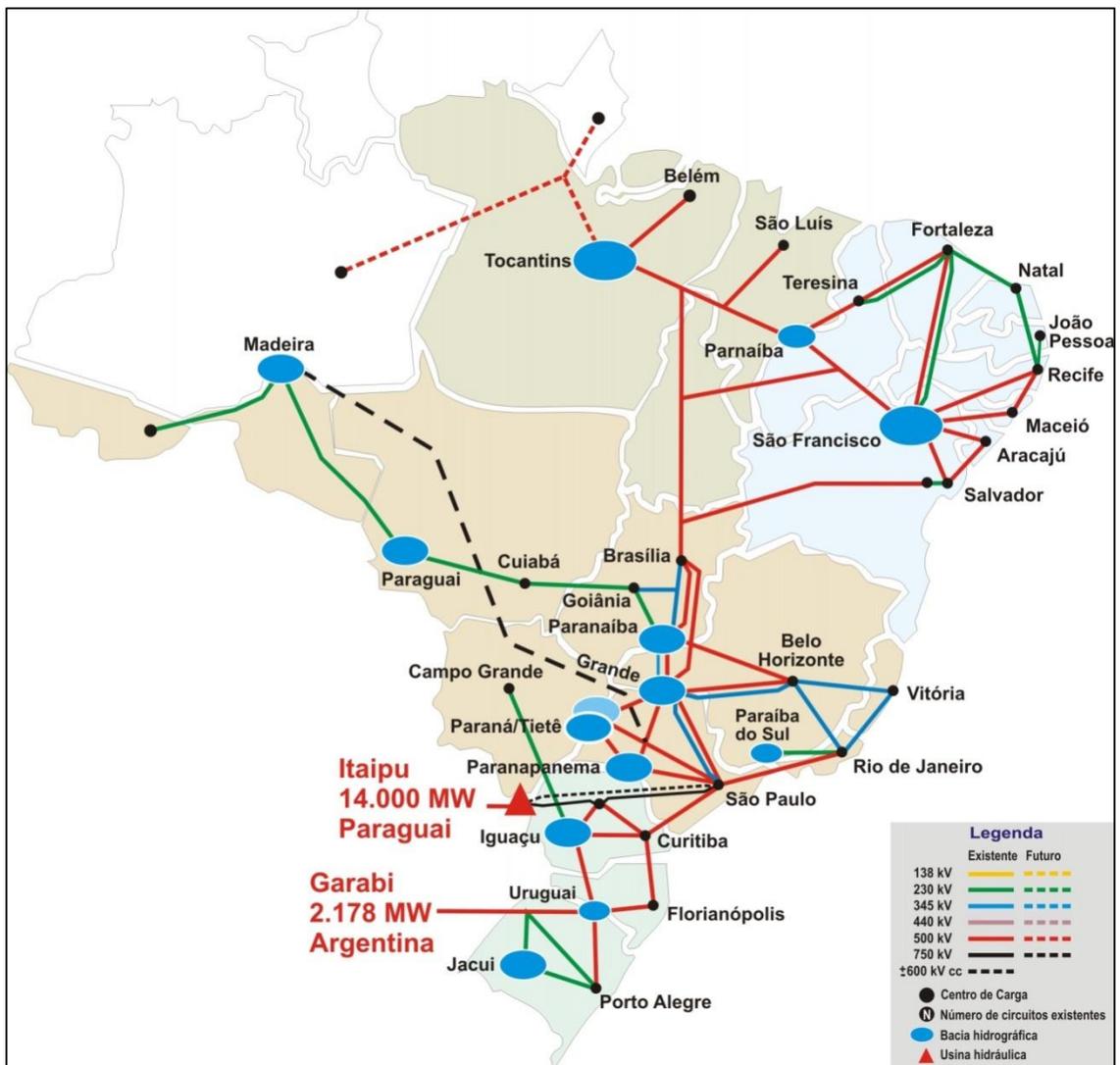
Atualmente, segundo Aneel (2013), o Brasil possui no total 2.848 empreendimentos em operação, gerando com 123.894.971 kW, conforme Tabela 2.2. Para os próximos anos, prevê-se uma adição de 42.529.009 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 156 empreendimentos atualmente em construção e mais 551 outorgadas.

Tabela 2.2: Empreendimentos em Operação.

<b>Empreendimentos em Operação</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Qualidade</b>	<b>Potência Fiscalizada (kW)</b>	<b>%</b>
CGH	418	253.413	0,2
EOL	94	2.074.541	1,67
PCH	457	4.441.746	3,59
UFV	14	7.617	0,01
UHE	190	80.105.581	64,66
UTE	1.673	35.005.073	28,25
UTN	2	2.007.000	1,62
<b>Total</b>	<b>2.848</b>	<b>123.894.971</b>	<b>100</b>

Fonte: Aneel (2013).

Deste modo, pode ser verificada a grande importância de usinas hidrelétricas para o sistema, que atualmente contribui com aproximadamente 70 % da capacidade de geração. Contudo, para o atendimento a demanda, existe a necessidade de grandes interligações para atendimento do planejamento energético (Figura 2.12).



### 2.4.1 Modelo de operação do SIN

O ONS é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica. Segundo informações obtidas em ONS (2013), para o exercício de suas atribuições legais e o cumprimento de sua missão institucional, o ONS desenvolve uma

série de estudos e ações a serem exercidas sobre o sistema e seus agentes para manejar o estoque de energia de forma a garantir a segurança do suprimento contínuo em todo país.

A coordenação da operação do sistema de reservatórios do setor elétrico, em conjunto com outras fontes de energia, permite o melhor aproveitamento das vazões naturais, evitando o desperdício de água e gastos excessivos com combustíveis. Essa coordenação é feita no âmbito do chamado Planejamento da Operação do Sistema Interligado, executado no ONS.

O planejamento do sistema, devido à sua complexidade, é atualmente feito em etapas com o auxílio de modelos desenvolvidos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (MACEIRA et al., 2002).

Costa et al. (2007) afirmam que em cada etapa, os modelos utilizados possuem diferentes horizontes de planejamento, discretização do tempo e grau de detalhamento em suas representações, em particular das afluências hidrológicas futuras.

Na Tabela 2.3, apresentem-se as características dos modelos energéticos e hidrológicos desta cadeia.

Tabela 2.3: Características dos modelos.

<b>Etapa</b>	<b>Médio Prazo</b>	<b>Curto Prazo</b>	<b>Programação da Operação</b>
Modelo Hidrológico	GEVAZP	PREVIVAZ / GEVAZP	PREVIVAZH
Modelo de Otimização	NEWAVE	DECOMP	DESSEM
Horizonte de Planejamento	Até 10 anos	Até 1 ano	Até 14 dias
Discretização Temporal	Mensal	Semanal / Mensal	Horária / Patamares
Afluências Hidrológicas	Estocástico	Determinístico / Estocástico	Determinístico

Fonte: Costa et al.(2007).

Segundo Costa et al.(2007), o planejamento da operação de médio prazo é realizado por meio do modelo NEWAVE, que constrói uma política a ser usada no início de cada mês, decidindo a demanda total de energia do próximo mês que será atendida pelo parque térmico e quanto será atendida por cada subconjunto de hidroelétricas agrupadas por regiões.

O modelo NEWAVE estabelece a política de operação de médio prazo (horizonte de cinco anos com discretização mensal) considerando três patamares de carga. Esse modelo calcula uma função de custo futuro que é conectada ao modelo DECOMP no final do horizonte de planejamento.

O modelo DECOMP estabelece a política de operação de curto prazo (horizonte de até 1 ano com discretização semanal para o primeiro mês e mensal para os demais meses). Esse modelo calcula uma função de custo futuro que é acoplada ao modelo DESSEM no final do horizonte de planejamento.

O modelo DESSEM determina o despacho de geração horário (semi-horário no primeiro dia e horário nos dias restantes) considerando no final do horizonte (1 semana) a função de custo futuro calculada pelo modelo DECOMP.

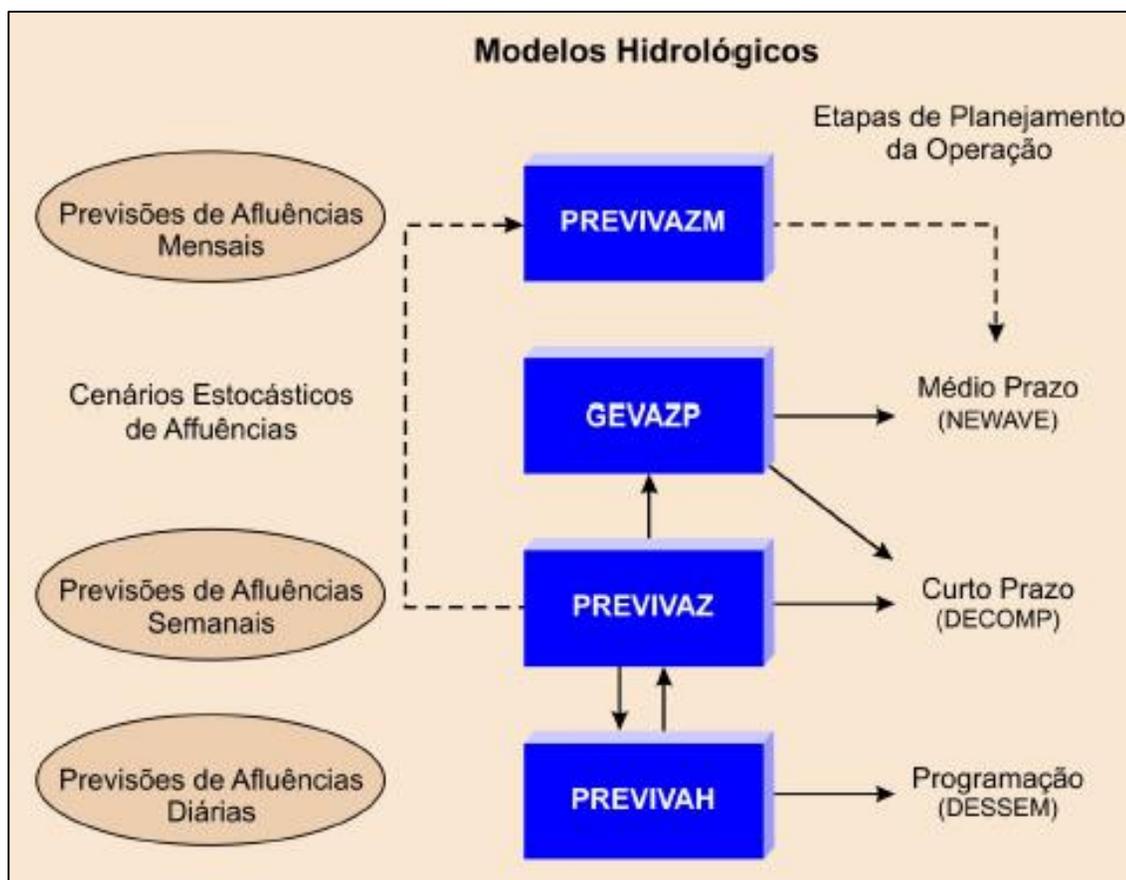
O NEWAVE é composto por quatro módulos computacionais: módulo de cálculo do sistema equivalente, que calcula os subsistemas equivalentes de energia; módulo de energias afluentes, que estima os parâmetros do modelo estocástico e gera séries sintéticas de energias afluentes que são utilizadas no módulo de cálculo da política de operação hidrotérmica; módulo de cálculo da política de operação hidrotérmica, que determina a política de operação mais econômica para os subsistemas equivalentes, e o módulo de simulação da operação, que simula a operação do sistema ao longo do período de planejamento, para cenários distintos.

O NEWAVE possui forte interface com o modelo GEVAZP, que considera a previsão hidrológica por meio de cenários sintéticos de sequências de energias naturais afluentes às sub-regiões para os próximos 5 anos, geradas pela modelagem autorregressiva linear.

Segundo Costa et al. (2007):

No planejamento de curto prazo, os blocos de geração hidráulico e térmico definidos pela política de longo prazo para o primeiro mês são desagregados em metas semanais de geração para cada usina do sistema (modelo DECOMP). A hidrologia é considerada parte determinística e parte estocástica. Para cada semana do primeiro mês, as afluições são consideradas conhecidas utilizando-se previsões obtidas pelos modelos PREVIVAZ (MACEIRA et al., 1994) e cpins (ACIOLI et al., 2004). Para os demais meses do horizonte do estudo, consideram-se cenários de afluições mensais gerados pelo modelo GEVAZP. Hoje, é considerado um horizonte de apenas 2 meses. Na programação diária (modelo DESSEM), a hidrologia é considerada de forma determinística, por meio da previsão de afluições diárias para um horizonte de 7 a 13

dias. O modelo PREVIVAZH (COSTA et al., 2000, LIVINO et al., 2001) foi desenvolvido para este fim. A Figura 2.13 apresenta a interação entre os modelos hidrológicos e a cadeia de planejamento da operação do SIN (COSTA et al., 2007).



Fonte: Costa et al. (2007).

Figura 2.13: Interação entre os modelos hidrológicos e a cadeia de planejamento da operação do SIN

## 2.4.2 Modelos de usos múltiplos

Dentre os modelos estudados para aprimoramento do sistema energético, Bravo et al. (2009) analisaram os benefícios obtidos com a otimização da operação baseada na previsão perfeita de vazões. Como resultado, os autores afirmam que pode haver um benefício relativo de aproximadamente 8 %, se forem utilizadas as previsões de longo prazo, com dois meses de antecedência, sendo que, no mesmo estudo, foi observado que, para uma mesma frequência, os benefícios aumentam na medida em que se utilizam previsões com maiores horizontes, como era esperado.

Para a maioria dos empreendimentos integrantes do Sistema Interligado Nacional (SIN), isto é feito por meio de simulações de modelos estocásticos, que se baseiam na série histórica de vazões observadas, dos rios em diferentes postos fluviométricos e de séries de vazões afluentes aos reservatórios das usinas hidrelétricas, com base na probabilidade de falha estimada por meio do uso de séries históricas de vazão que iniciaram em 1930.

Bravo et al. (2005) afirmam que, no Brasil, o uso preponderante da água é a geração de energia, possuindo um dos maiores sistemas de usinas hidrelétricas do mundo, com um sistema operado pelo ONS, com o objetivo principal da minimização do custo da geração de energia térmica, atendendo à demanda de energia elétrica com certa garantia, sendo que esse enfoque nem sempre leva em conta a otimização conjunta de usos múltiplos da água, por isso, uma abordagem multiobjetivo ou multicritérios se apresenta como mais conveniente.

Labadie (2004) sugere que as funções objetivo usadas nos modelos de otimização de sistemas de reservatórios devem incorporar medidas de desempenho tais como eficiência (maximizar o bem-estar atual e futuro), sobrevivência (assegurando que o bem-estar futuro excederá os níveis de subsistência mínimos) e sustentabilidade. Esta última medida pode ser considerada igual a uma soma ponderada da: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade dos vários critérios que contribuam ao bem-estar do homem (econômico, ambiental ou ecológico).

Montaseri et al. e Merabtene et al. (apud Bravo et al., 2005) definem que as regras operativas devem considerar as medidas de desempenho, baseadas na confiabilidade (probabilidade do sistema de funcionar sem falhas durante um período definido de operação), resiliência (pretende capturar características estatísticas das falhas, sendo que o resultado pode ser usado para prever a probabilidade de falha e avaliar o potencial do sistema para recuperar-se da falha), vulnerabilidade (medida da magnitude da falha, permite conhecer o nível de exposição do sistema a perigos identificados), índice de sustentabilidade (valor geral que integra as medidas de desempenho por meio de uma soma ponderada das três anteriores).

O trabalho de Ros e Barros (2003) comparou seis funções objetivo (minimizar a perda da energia potencial armazenada; minimizar desvios entre o armazenamento e sua meta; maximizar a produção total de energia; minimizar a energia vertida; minimizar complementação de energia e maximizar o lucro derivado da energia secundária) para otimizar a operação de um sistema de múltiplos reservatórios, com objetivo de minimizar o uso de fontes alternativas de energia, diminuindo o custo operacional total e tentando alcançar a máxima produção do sistema. Dentre as funções, calcula-se um índice que representa

a relação entre o racionamento de água feito na operação do reservatório para evitar escassez mais sérias e a demanda de água para diversos usos. Os autores concluíram que, em geral, a função objetivo utilizada para minimizar a complementação de energia no sistema produz políticas de operação mais adequadas para o sistema hidroenergético.

Bravo et al. (2005) citam o trabalho de Wurbs (1996) como um dos mais importantes em relação às regras de operação, pois inclui a divisão do armazenamento total em diferentes faixas que possuem políticas de descargas específicas, em que a distribuição do armazenamento nestas faixas pode ser constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal.

Lopes et al. (2003) desenvolveram um sistema para operar reservatórios, considerando usos múltiplos, tendo como estudo de caso a bacia do rio São Francisco. Neste trabalho, pode ser verificado que o uso múltiplo da água no rio São Francisco caracteriza-se fundamentalmente por atender à produção de energia elétrica, à irrigação, à navegação e em alguns trechos ao controle de cheias. Os resultados obtidos apontam para uma tendência de aumento na competitividade dos usos preponderantes irrigação e energia e que nos cenários de disponibilidade hídrica mediana e baixa, para cada 1 m<sup>3</sup>/s de água desviada para irrigação, perde-se cerca de 2,5 MW-médios, o que equivale aproximadamente a 22 GWh/ano, e apontam como solução o aumento da capacidade da interligação elétrica da região Nordeste com as regiões Norte e Sudeste como a melhor alternativa de substituição das perdas de energia devido ao uso múltiplo.

Além disso, os autores consideram que existe a necessidade de não mais se considerar a geração como uso prioritário, pelo fato que os outros usos, principalmente abastecimento e irrigação, apresentam grande valor social e econômico.

Bravo et al. (2006) realizaram um modelo de simulação de operação de reservatórios com base na previsão de vazão afluente chamado AMANDA. Os autores consideram que fazer a previsão de vazão afluente de médio e curto prazo para reservatórios pode ser útil para reduzir conflitos das operações, quando o reservatório é operado para atender aos múltiplos usos da água, com base nos estudos desenvolvidos no reservatório de Três Marias na bacia do rio São Francisco.

A Usina Hidrelétrica de Furnas foi objeto de estudo de Ribeiro Junior (2004), que teve como objetivo formular uma regra de operação que ponderasse tanto os interesses de jusante como os de

montante, evoluindo para a fixação dos parâmetros de duração e frequência de transgressão para alguns níveis pré-estabelecidos, com intuito de haver maior sustentabilidade no desenvolvimento de atividades pela população ribeirinha, sem haver grandes perdas na geração de energia para a usina em estudo. Foram propostas regras de operação para que esses parâmetros fossem alcançados, sempre considerando um horizonte de planejamento de dez anos, demonstrando ser possível para as usinas hidrelétricas operarem de modo a atender ao interesse de todos os usuários, conforme preconiza a Lei 9.433 de 1997.

## 2.5 Conflitos pelo uso da água em reservatórios de hidrelétricas

Nesta seção são apresentados alguns casos de incompatibilidade de usos da água em reservatório para geração de energia.

Vilas Boas (2006), em seu trabalho, assegura que em alguns locais, a disponibilidade de água frente a diversos usos múltiplos já se apresenta frágil. No entanto, segundo o autor, esse problema pode ser reduzido quando prevalece o uso sustentável do recurso hídrico, de muita importância para a vida humana, e afirma que quando a situação de equilíbrio não ocorre, o governo e a sociedade têm que despender esforço para gerenciar a oferta e a demanda do recurso e estabelecer uma situação harmônica.

Migliorini et al. (2010) afirmam que o uso dos reservatórios hidrelétricos para fins de lazer e turismo vem ocorrendo intensamente em grande parte dos lagos de usinas hidrelétricas, e existe a necessidade de ser utilizado de forma a promover o desenvolvimento regional, como é o caso do reservatório Salto Osório, que passou a ser o grande atrativo turístico do Sudoeste do Paraná. Nesse sentido, os autores concluem que é necessário propor formas concretas de se promover o turismo ambientalmente sustentável, economicamente viável e socialmente justo, tendo como suporte, a dinâmica local e o planejamento participativo.

Os conflitos pelo uso da água no entorno do reservatório da UHE Tucuruí foram estudados por Louzada (2009), sendo identificados três principais tipos de conflitos no reservatório: conflitos entre distintos grupos de usuários da água (dos quais as situações conflitantes envolvem diferentes usos da

água), conflitos por obras hidráulicas (neste caso são identificados os conflitos entre os benefícios da construção da obra e o desenvolvimento das atividades que se desenvolveram em função da construção da UHE) e conflitos decorrentes de poluição ambiental (do qual a qualidade da água é afetada por processos de poluição e/ou contaminação).

Em Furnas, conforme Engel (2002), o rebaixamento prolongado do nível das águas do reservatório, resultante de condições hidrológicas desfavoráveis e de redução nos investimentos do setor elétrico brasileiro, resultou em perdas significativas para os usuários das águas do lago, que passaram a pleitear uma cota mínima de operação (762 m), sob alegação que todos os empreendimentos turísticos foram construídos com base nesta cota, além de recursos para tratamento dos esgotos urbanos. Dados da Associação dos Usuários do Lago de Furnas (ASUL) mostram que os principais impactos da redução do nível foram:

- redução no movimento de turistas em 70%;
- diminuição de 40 % na produção agrícola;
- transtorno nas propriedades lindeiras para a dessedentação animal;
- redução na qualidade e quantidade de peixes.

De maneira complementar, Santos (2002) afirma que o esgoto proveniente das áreas urbanas, que antes era lançado diretamente no lago, mesmo sem qualquer tratamento, conta de imediato, com uma enorme capacidade de diluição, reduzindo sobremaneira seu impacto direto no ambiente. Com o rebaixamento do reservatório, o efluente passa a percorrer grandes distâncias a céu aberto, onde o processo de decomposição da matéria orgânica já se estabelece, provocando o aparecimento de odores e colocando em risco a saúde das pessoas e dos animais que possam ter contato (Figura 2.14).



Figura 2.14: Reservatório de Furnas na cidade de Carmo do Rio Claro em dois momentos, vazio em 2001 e cheio em 2003.

O esvaziamento do reservatório até níveis extremos, por um longo período de tempo, tem permitido o aparecimento de grande quantidade de vegetação, principalmente nas áreas de várzea antes alagadas. Quando as águas retornam, a vegetação entra em decomposição, com reflexos imediatos na piora da qualidade da água, notadamente junto às margens, onde se desenvolve a maioria das atividades turísticas.

Adicionalmente, o autor afirma que a exposição de extensas áreas de margens, especialmente as de topografia mais acidentada, acelera o processo de assoreamento, em virtude do carregamento do solo que, sem a proteção da vegetação, é levado pelas águas de chuva, reduzindo o volume do reservatório, dificultando a utilização das águas próximas às margens, em que ocorre grande parte da atividade turística, e contribuindo para a degradação da qualidade da água.

Em termos econômicos, Corrêa et al. (2006) relatam que 14 municípios do entorno tiveram um prejuízo de quase 140 milhões de reais entre 1999 e 2005, oriundos da redução do nível do lago, sendo o setor agropecuário o maior prejudicado com 66,6%, seguido do turismo com 15,2%.

De maneira complementar, Almeida et al. (2007) afirmam que existe uma perda estimada de R\$ 1,6 milhões, somente do setor do turístico por mês que o reservatório se encontra abaixo da cota 762 m.

Fernades e Bursztyn (2008) afirmam que, mediante o tradicional domínio do setor elétrico como agente do processo de gestão dos recursos hídricos no Brasil, faz-se necessária a adoção dos usos

múltiplos da água em caráter emergencial, pois a construção de grandes barragens para geração de energia tem demonstrado que este setor continua a ser priorizado frente aos demais, gerando conflitos.

Os autores afirmam que é necessário disseminar a importância dos usos múltiplos das águas dos reservatórios, seja de hidrelétricas já construídas ou em fase de planejamento, para que ocorra o desenvolvimento local e regional, com a melhoria das condições de vida da população, por meio de uma gestão integrada, eficiente e participativa.

De maneira complementar, Fernandes e Bursztyn (2008) afirmam que construção de grandes hidrelétricas não deve continuar a ser decidida com a imposição do interesse público (o interesse coletivo para o desenvolvimento do País) sobre o interesse privado (o conjunto de interesses das populações locais), mas deve ser objeto de debate.

Em termos práticos, para atendimento ao sistema interligado, o ONS trabalha em função de algumas restrições impostas, como por exemplo, a usina de Barra Bonita, que tem a restrição de manter o nível mínimo para manter a navegabilidade no rio Tietê, que é de 446,50 m.



### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Estudo de caso – Bacia de Furnas

A região de estudo está inserida na Bacia do Rio Grande (sub- bacia 61) que pertence à bacia do Rio Paraná, localizada na região sudeste do Brasil, nos estados de Minas Gerais e São Paulo, entre os paralelos de 20° 06' e 21° 23' de latitude sul e entre os meridianos de 49° 30' e 45° 45' de longitude oeste. A região drena uma área total de aproximadamente 145.000 km<sup>2</sup> (Figura 3.1).

A partir de suas cabeceiras, o rio percorre cerca de 700 km inteiramente em território mineiro, o que equivale a 17,8% da área do estado, e, a partir de confluência com o Rio Canoas, faz fronteira entre São Paulo e Minas Gerais por cerca de 600 km.

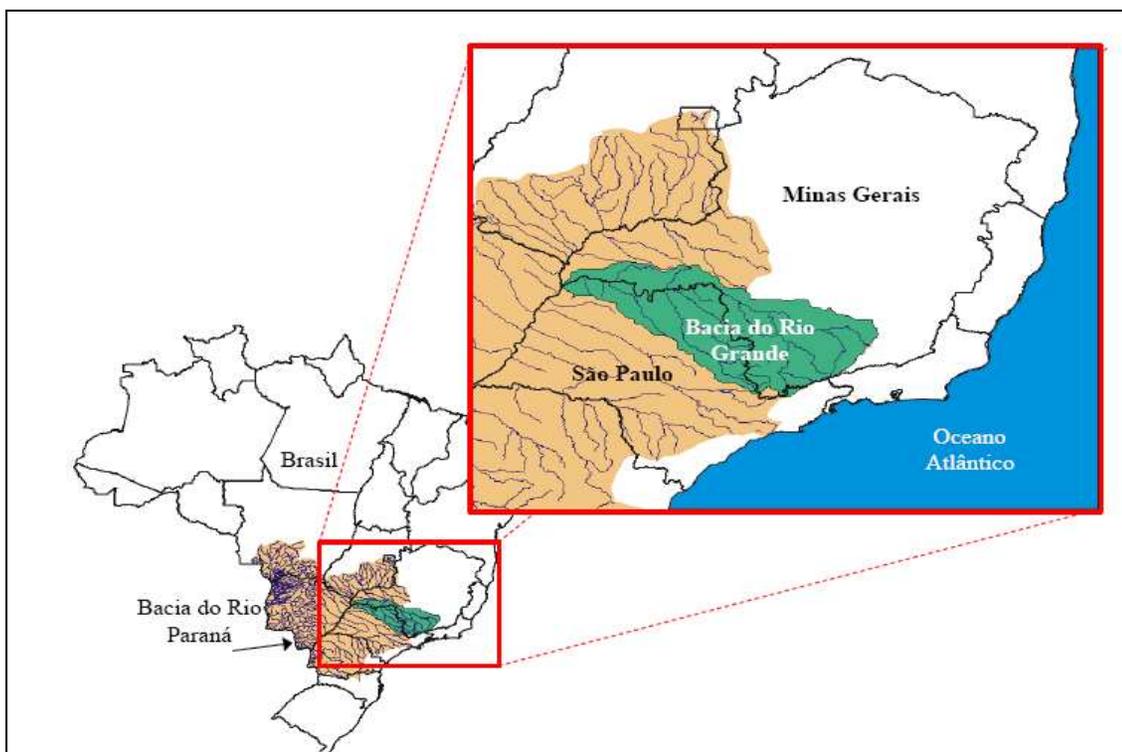


Figura 3.1: Bacia do Rio Paraná e Bacia do Rio Grande.

A área de drenagem da usina hidrelétrica de Furnas (Figura 3.2) tem aproximadamente 52.000 km<sup>2</sup>; está localizada no curso médio do rio Grande, no trecho denominado "Corredeiras das Furnas", entre os municípios de São João da Barra e São João Batista do Glória, em Minas Gerais.

A UHE, além de se constituir um marco de instalação de grandes hidrelétricas no Brasil, possibilitou a regularização do rio Grande e a construção de mais oito usinas, aproveitando, integralmente, um potencial de mais de 6.000 MW instalados, que representa aproximadamente 10% da capacidade hidrelétrica instalada no País. Segundo o CBH Furnas (2012), o clima predominante é o tropical de altitude, que se caracteriza por ser mesotérmico, úmido e com chuvas torrenciais. Esse clima também apresenta como característica importante temperaturas amenas com poucas variações, além de chuvas no verão e seca no inverno. As temperaturas médias anuais oscilam entre 21 e 23°C. O verão e a primavera são os períodos mais quentes, quando as máximas diárias variam em torno de 28 e 30°C. A bacia tem nas atividades agropecuárias sua principal fonte de riqueza.

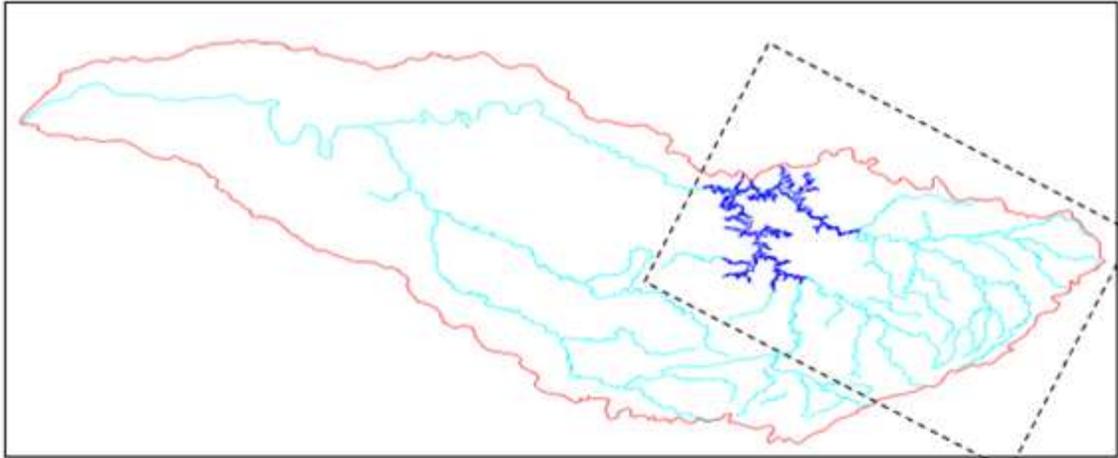


Figura 3.2: Delimitação da área de estudo.

A Central Elétrica de Furnas foi criada em 28 de fevereiro de 1957, por meio do Decreto Federal número 41.066, com o desafio de sanar a grave crise energética que ameaçava os três principais centros socioeconômicos do país: São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte (FURNAS, 2012).

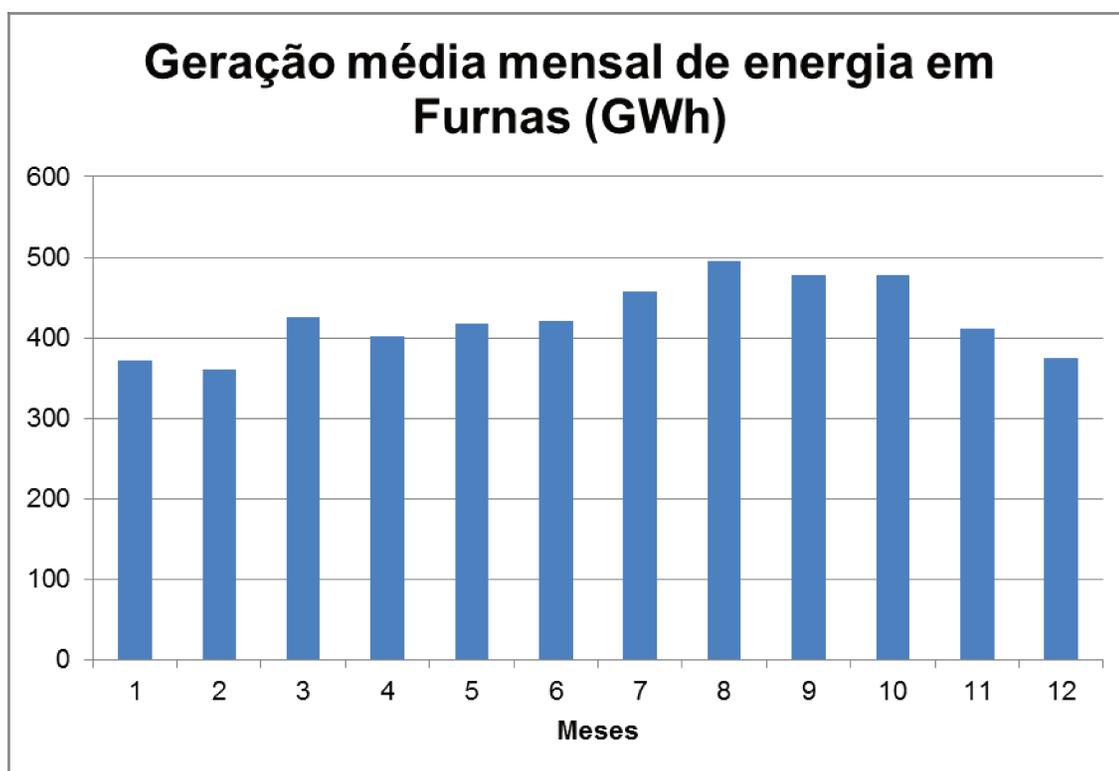
A hidrelétrica de Furnas foi a primeira usina construída pela Empresa, da qual herdou o nome. É administrada indiretamente pelo Governo Federal, vinculada ao Ministério de Minas e Energia e controlada pela ELETROBRAS. Sua construção começou em julho de 1958, tendo, a primeira unidade, entrado em operação em setembro de 1963 e a sexta, última prevista em projeto, em julho de 1965 (Figura 3.3).



Fonte: Furnas (2012).

Figura 3.3: Represa de Furnas antes e depois de sua implantação.

No início da década de 1970, foi iniciada a ampliação para instalação da sétima e oitava unidades, totalizando 1.216 MW, o que colocou a obra entre uma das maiores da América Latina. Os dados históricos da geração estão apresentados no Anexo A. A Figura 3.4 apresenta a produção média mensal da geração de energia da UHE no período de 1963 a 2012.



Fonte: Furnas (2012).

Figura 3.4: Geração média de energia na UHE de Furnas.

Conforme apresentado na Figura 3.4, nos períodos de Julho a Outubro, a geração de energia é maior e isso se deve pela capacidade de regularização da UHE, bem como pela importância da “liberação” da vazão afluente, que possibilita que as demais hidroelétricas da cascata localizadas a jusante possam utilizar a mesma vazão.

Contudo, nos meses mais chuvosos a barragem além de cumprir o seu papel da geração tem a função de armazenar água para o período de estiagem. Ainda analisando a geração da usina, o ano de 1997 foi o que teve a maior produção de energia, com 8010 GWh, sendo que o menor índice foi registrado

em 2002 com 2546 GWh. Do ponto de vista mensal, as maiores produções ocorrem em novembro de 1997 e dezembro de 1991 com 790 GWh, já o mês fevereiro de 2002 teve uma produção de apenas 28 GWh.

O reservatório de Furnas tem cerca de 1.440 km<sup>2</sup> de área inundada, quatro vezes a Baía de Guanabara. É o maior lago artificial da América Latina, conhecido como o “Mar de Minas”. Possui perímetro de 3.500 km e banha 34 municípios com população de aproximadamente 850.000 habitantes (Figura 3.5).



Fonte: Alago (2012).

Figura 3.5: Municípios do Entorno de Furnas.

O projeto de aproveitamento prevê uma variação de cota entre 768 e 750 m (nível máximo e mínimo de operação), sendo que a série encontra-se no Anexo A, deste trabalho. A Figura 3.6 representa o comportamento do reservatório no período de 1963 a 2011.

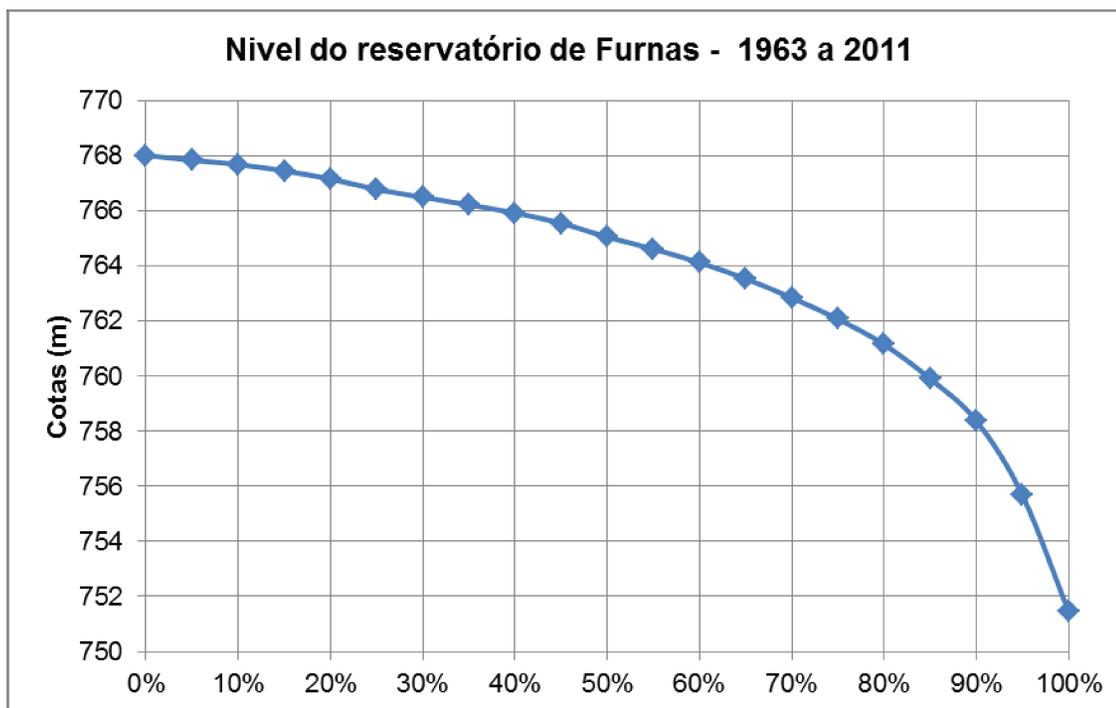


Figura 3.6: Cotas média mensal de Furnas no período de 1963 a 2011.

Na Figura 3.6, pode ser observado que o reservatório permaneceu 75 % do tempo com uma cota igual ou superior a 762 m. Contudo, entre os anos de 1998 e 2000, época de maior crise do setor elétrico, esse mesmo nível esteve presente apenas 30% do tempo, fato esse que acarretou diversos danos, conforme mencionado no capítulo anterior.

### 3.2 Critérios para seleção dos dados hidroclimáticos

O processo de triagem das informações é uma etapa fundamental para subsidiar as pesquisas que envolvem estudos sobre o comportamento e tendências de variáveis climáticas. Nesse processo, deve

ser avaliada a disponibilidade, consistência, abrangência e falhas, ou seja, aspectos quantitativos e qualitativos referente às séries históricas.

No Brasil, existem diversas instituições que disponibilizam a base de dados meteorológicos e hidrológicos que podem ser utilizados para diferentes finalidades em estudos, projetos, políticas públicas etc. que cobrem de forma abrangente o território nacional, entretanto, as políticas de acesso e difusão são específicas de cada instituição, o que dificulta em alguns casos o acesso à informação. A ANA, conforme preconizada por sua lei de criação, a 9.984 de julho de 2000, é responsável por organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), trabalho este que vem sendo desenvolvido pelo Sistema de Informações Hidrológicas - HidroWeb e do SNIRH, que é o principal banco de dados com todas as informações coletadas pela rede hidrometeorológica.

Além da disponibilidade do dado, a consistência (veracidade) do valor é muito importante e deve ser realizada diariamente para se evitar que possíveis equívocos durante o processo de obtenção possam prejudicar análises ou estudos futuros. Segundo Santos et al. (2001), por via de regra, o valor observado difere do valor verdadeiro por uma diferença que recebe o nome de “erro de observação”. Mais tarde, na manipulação dos dados observados, podem ocorrer alterações involuntárias do valor observado. Esse erro denomina-se em geral “erro de transcrição”.

Os erros de observação classificam-se, de acordo com a teoria dos erros, em três categorias: erros grosseiros, erros sistemáticos e aleatórios. Os erros grosseiros resultam de erro humano como já mencionado. Os erros sistemáticos são causados por fontes identificáveis, e, a princípio, podem ser eliminados ou compensados, como por exemplo, uma falha em um aparelho. Já os erros aleatórios são inerentes aos atos de medir. A análise de consistência extrai os erros mais grosseiros. A análise de consistência não deve incorrer em erros que podem distorcer os dados, ou seja, intervir demais na informação. Desse modo, para que se evitem possíveis tendências aos dados coletados, não foi realizado o processo de preenchimento de falhas. Além disso, visando dar maior consistência aos estudos foram utilizadas séries com no mínimo 30 anos de dados.

### 3.3 Métodos estatísticos para análise de tendência temporal dos dados climáticos

O estudo climatológico tem como fundamento a análise de dados históricos das variáveis meteorológicas, buscando compreender a dinâmica do clima, detectando possíveis variações, mudanças ou tendências que venham a descrever as características climáticas de uma determinada localidade ao longo do tempo, como também, os fatores que desencadeiam ou controlam essa dinâmica. Para validação desses estudos, são necessárias aplicações de métodos estatísticos, paramétricos e não paramétricos que, conforme apresentado no capítulo anterior, serão mais bem detalhados nas seções a seguir.

#### 3.3.1 Teste de Mann-Kendall

O Teste de Mann-Kendall foi proposto inicialmente por Sneyers (1975). É utilizado para identificação de tendência em uma série temporal.

Seja uma série de dados dada por  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i, Z_j, \dots, Z_n\}$ . Compara-se cada valor de  $Z$  com o subsequente e cria-se uma nova série dada pela Equação 3.1:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sinal}(Z_i - Z_j) \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$\text{SINAL}(Z_i - Z_j) = \begin{cases} 1; \text{ para } Z_i - Z_j > 0 \\ 0; \text{ para } Z_i - Z_j = 0 \\ -1; \text{ para } Z_i - Z_j < 0 \end{cases}$$

Para séries maiores que 30 números de termos ( $N$ ), o teste segue com a seguinte estatística, em que a média  $E(S)$  e a variância é dada pela Equação 3.2:

$$E(S) = 0$$

$$V(S) = \frac{1}{18} \times \left[ N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^n e_i(e_i-1)(2e_i+5) \right] \quad (\text{Equação 3.2})$$

Sendo: N é o tamanho da série temporal,  $e_i$  é o número de valores iguais na série de dados.

O teste estatístico é dado pela Equação 3.3:

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{V(S)}}; S > 0 \\ 0; S = 0 \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{V(S)}}; S < 0 \end{cases} \quad (\text{Equação 3.3})$$

Se Z for positivo significa que há uma tendência crescente e um Z negativo indica tendência decrescente. O valor Z calculado pode ser comparado com valores de Z tabelados para distribuição normal.

Para o nível de significância de 5%, Z deve estar entre -1,96 e 1,96. Caso Z seja inferior a -1,96 há significativas tendências de queda nos valores da série de dados. Quando Z é superior a 1,96 há significativas tendências de elevação. O teste de Mann-Kendall foi aplicado, separadamente, a cada série dos postos selecionados. Valores menores que (+1,96) têm tendência não significativa de aumento e maior que (-1,96), tendência não significativa de queda, sendo que o valor zero representa que não existe tendência na série. O teste de Mann-Kendall foi aplicado no intuito de verificar tendências climáticas, ou seja, verificar se as precipitações estão aumentando ou diminuindo.

Contudo, conforme apresentado por Blain (2009), a autocorrelação positiva ou negativa nas séries afeta a sensibilidade do método, de modo a aumentar a probabilidade de serem identificadas falsas tendências.

### 3.3.2 Teste de Pettitt

O teste de Pettitt é um teste não paramétrico, descrito por meio da estatística  $U_{t,T}$  que verifica a quantidade de vezes que o número da primeira amostra é maior que um elemento da segunda,  $Y_1, \dots, Y_t$  e  $Y_{t+1}, \dots, Y_T$ , conforme apresenta-se na Equação 3.4. Do mesmo modo que no teste de Mann-Kendall, neste teste foi adotado um nível de 5 % de significância, que representa um valor de 1,96.

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} \sum_{j=1}^T \text{sinal}(y_t - y_j) \text{ para } t = 2 \dots T \text{ e } 1 \leq j \leq T \quad (\text{Equação 3.4})$$

Sendo:

$\text{sinal}(y_t - y_j) = 1$  para  $x > 0$ ;  $\text{sinal}(y_t - y_j) = 0$ ; para  $x = 0$ ;  $\text{sinal}(y_t - y_j) = -1$  para  $x < 0$ .

Após essa etapa, a estatística  $k(t)$  assume o maior valor absoluto dos fatores  $U_{t,T}$ , indicando o ponto de mudança brusca (*changing point*) do valor máximo de  $K(t)$ , quando esse for maior que o limite crítico estabelecido. O valor de  $k(t)$  é dado pela Equação 3.5.

$$K(t)_{\text{crítico}} = \pm \sqrt{\frac{(T^3 - T^2) \cdot [-\ln(\frac{p}{2})]}{6}} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Em que  $p$  se refere ao nível de 5 % de significância.

Na Figura 3.7, tem-se um exemplo de aplicação do método de Pettitt, conforme o trabalho de Back e Vieira (2009), em que foram analisadas as séries históricas de precipitação mensal de 1924 a 2008 na estação meteorológica de Urussanga no estado de Santa Catarina.

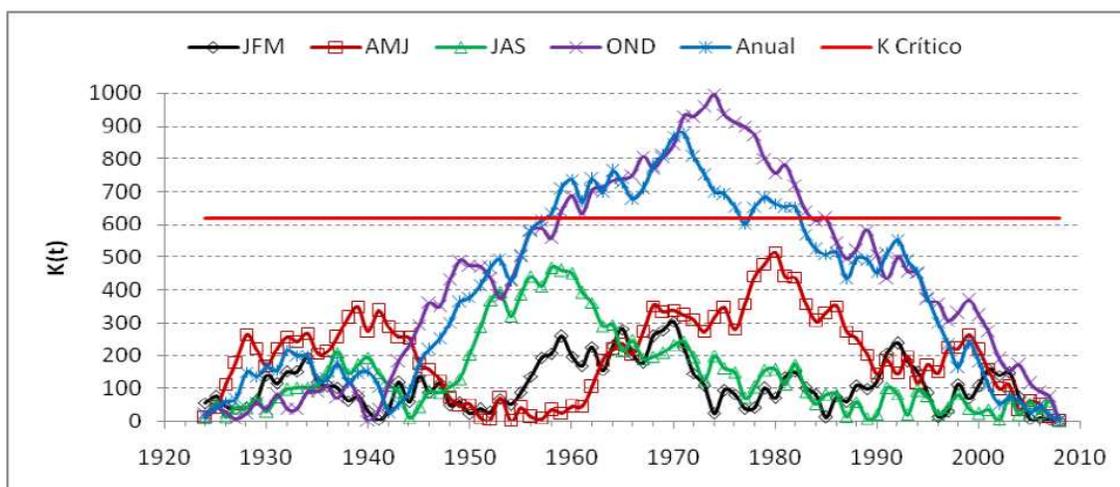


Figura 3.7: Resultados do teste de Pettitt para as diferentes séries de dados de precipitação.

Pelo teste de Pettitt, observa-se uma mudança na série de precipitação do trimestre Outubro/Novembro/Dezembro que ocorre no ano de 1975 e na série anual no ano de 1972, enquanto que para as demais séries não foram identificadas mudanças.

### 3.3.3 Teste Run

O teste Run é um teste não paramétrico usado para avaliar se uma série ocorre aleatoriamente. Consiste em realizar a contagem do número de oscilações dos valores acima e abaixo da mediana, numa série de dados naturalmente ordenada. O número de oscilações é chamado de Run, e deve-se testar se o valor observado está dentro da faixa de distribuição considerada normal.

Um valor alto de Run indica muitas oscilações, ao passo que baixos valores indicam um desvio em relação à mediana durante o período de registros. Nesse caso, determina-se na série a quantidade de valores inferiores ( $N_1$ ) e superiores ( $N_2$ ), respectivamente em relação à mediana, bem como o número de sequências ( $r$ ) de valores abaixo e acima da mediana contidas na amostra.

Se  $N_1$  ou  $N_2$  apresentam mais de 20 (vinte) dados, a distribuição amostral se aproxima da distribuição normal, sendo que a descrição matemática desse método é dada por:

Média:

$$\mu = \left( \frac{2N1 \cdot N2}{N1 + N2} \right) + 1 \quad (\text{Equação 3.6})$$

Desvio padrão:

$$\sigma = \left( \frac{2N1 \cdot N2(2N1 \cdot N2 - N1 - N2)}{(N1 + N2)^2(N1 + N2 - 1)} \right) \quad (\text{Equação 3.7})$$

Sendo que a condição do teste é:

$$z = \left( \frac{r - \mu}{\sqrt{\sigma}} \right) \quad (\text{Equação 3.8})$$

Com isso, adotando-se o mesmo nível de significância dos demais testes não paramétricos (5%), esse método indicará inexistência de correlação serial na série, quando seu valor final (Z) estiver contido no intervalo [-1,96;+1,96].

Para exemplificar a aplicação do teste, na sequência abaixo, o símbolo “E” indica os eventos que estão abaixo da mediana e o símbolo “C” os valores que estão acima.

*E, E, C, C, E, C, E, E, C, E, C, C, E, E, E, C, E, E, C, E, E, C, C, E, C.*

Neste caso, tem-se 25 (vinte e cinco) elementos, sendo que 14 são inferiores à mediana (N1), 11 são os valores superiores (N2), sendo que a série possui 16 sequências (r).

### 3.3.4 Teste de Spearman

Este teste permite avaliar o coeficiente de correlação r entre duas variáveis X e Y e mede o grau de associação, que deve estar situado no intervalo  $-1 < r < 1$ . Neste trabalho, em que se pretende avaliar qual a tendência existente na série de dados hidrológicos, a variável X representa o conjunto de dados hidrológicos em sua sequência natural, e a variável Y representa o ordenamento dessa variável em ordem crescente. Assim, o coeficiente de correlação de Spearman pode ser obtido por meio Equação 3.9.

$$r = 1 - \left( \frac{6 \sum d_1^2}{n^3 - n} \right) \quad (\text{Equação 3.9})$$

Em que  $d_1$  é a diferença entre a posição de cada valor X e o valor Y correspondente, e n representa o número de pares de dados.

Para amostras maiores que 20 observações, pode-se utilizar a aproximação apresentada pela Equação 3.10.

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{(1 - r^2)}{(n - 2)}}} \quad (\text{Equação 3.10})$$

Do mesmo modo que nos demais testes, foi adotado um intervalo de confiança de 95 % para os dados selecionados.

### 3.3.5 Flutuação anual

Dada uma série histórica formada pelos elementos  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , esse método se baseia no somatório da diferença entre todas as medidas em relação à média, sendo que o valor resultante é igual a zero. Neste caso, os maiores valores acumulados dos desvios indicam o quão longe em geral os valores se encontram do valor médio. A Equação 3.11 apresenta o que foi explicitado.

$$\sum d_i = x_i - \bar{x} \quad (\text{Equação 3.11})$$

Sendo:

$d_i = \text{desvio}$

$x_i = \text{posição consolidada}$

$\bar{x} = \text{média da amostra}$

Neste caso, a visualização gráfica dos dados estatísticos (Figura 3.8) é capaz de reproduzir uma impressão mais rápida e viva do fenômeno em estudo. O desvio é positivo quando a medida é maior que a média, e negativo quando a medida é menor que a média.



Figura 3.8: Variação acumulada da precipitação para o município de Ibertioga.

Com a aplicação dessa metodologia, foi possível observar que, no município de Ibertioga, houve um decaimento da precipitação até o início da década de 1970, e após esse período, o total precipitado anual foi maior que a média anual para o local em estudo.

### 3.3.6 Média Móvel

A média móvel é uma técnica utilizada para analisar o valor médio de uma amostra num determinado período. A expressão "média móvel" diz respeito à média aritmética de certo número (n) das observações mais recentes. À medida que se realizam novas observações, abandonam-se as observações mais antigas.

A (Figura 3.9) representa um exemplo da metodologia, que neste caso é feita considerando um conjunto de 10 dados, deste modo, calcula-se a média dos valores de “A até “J”. A próxima média se refere aos valores de “B até “K”, ou seja, o primeiro valor “A” foi excluído da amostra e um novo valor “K” foi incorporado ao conjunto de dados.



Figura 3.9: Aplicação do conceito de janela móvel.

A média móvel tem a vantagem de suavizar as flutuações estacionais e irregulares, mas não a tendência e nem as influências cíclicas. Na Figura 3.10, apresenta-se a aplicação do conceito de janela móvel para os dados de precipitação anual.

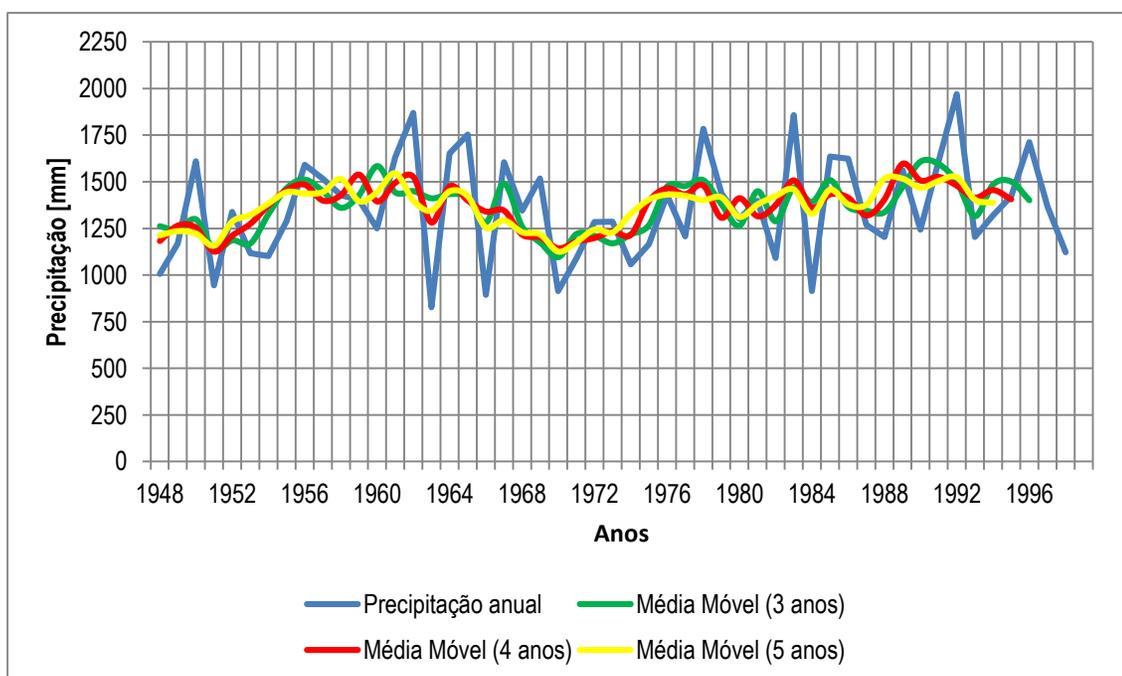


Figura 3.10: Precipitação total anual para o município de Monsenhor Paulo.

Neste gráfico, pode ser verificado que a aplicação da metodologia da janela móvel de 3, 4 e 5 anos suaviza os efeitos dos picos; entretanto, não afeta a tendência do comportamento das chuvas, que, neste caso, é de uma ligeira tendência de aumento.

### 3.3.7 Regressão Linear

A regressão linear é um método estatístico (paramétrico) para se estimar um valor esperado de uma variável “y”, em função dos valores de outra variável “x”. A regressão linear é assim denominada porque considera que a relação da resposta às variáveis é uma função linear de alguns fatores. Os modelos de regressão que não são uma função linear dos parâmetros se chamam modelos de regressão não linear.

Neste trabalho, o ajuste entre essas variáveis foi realizado para uma linha de tendência linear, que é uma linha reta de ajuste usada com conjuntos de dados lineares simples. Assim, os dados são lineares e os padrões nos pontos de dados parecem com uma linha de tendência linear, que mostra se algo está aumentando ou diminuindo com uma taxa fixa, ou seja, a análise de regressão é capaz de fazer uma estimativa da relação entre variáveis para que determinado valor possa ser previsto a partir de uma ou mais variáveis diferentes.

Assim, esse método foi utilizado para verificar a associação da temperatura e vazão ao longo dos anos, assumindo que a associação entre essas variáveis seja linear. Esse ajuste proporciona a formação de uma equação matemática linear, do seguinte modo:

$$Y = a.x + b$$

Em que:

a= coeficiente angular (é a inclinação da reta, mede o aumento ou redução em y para cada aumento de uma unidade em x).

b = coeficiente linear (também chamado intercepto, é o valor que y assume quando x for zero).

Na Figura 3.11, apresenta-se um exemplo desta metodologia aplicada aos dados de precipitação anual no município de Antônio Carlos, em que pode ser verificada uma tendência de aumento dos dados de chuva para o período de estudo.

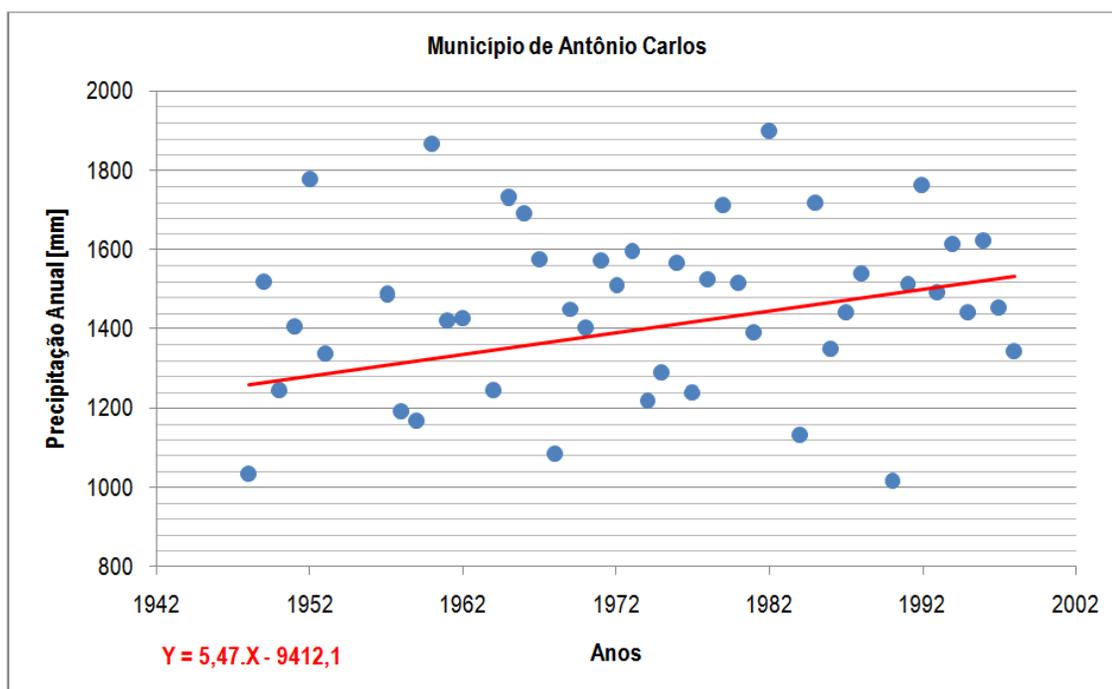


Figura 3.11: Distribuição da precipitação no município de Antônio Carlos.

### 3.4 Modelo de Grandes Bacias – MGB/IPH

O modelo MGB-IPH (COLISCHONN, 2001), utilizado neste trabalho para transformação da chuva em vazão, incorpora informações de características físicas das bacias, como o relevo, os tipos e usos do solo. Tais características são particularmente importantes em bacias com grande variabilidade espacial, como a presença de regiões com afloramentos rochosos, com alto potencial de geração de escoamento superficial e relevo acidentado, como o caso da bacia de Furnas.

O modelo é composto dos seguintes algoritmos: Balanço de água no solo, Evapotranspiração, Escoamentos: superficial, subsuperficial e subterrâneo na célula, escoamento na rede de drenagem (COLISCHONN, 2001). A estrutura mais detalhada do modelo é apresentada no Anexo C, ao final deste trabalho.

Para aplicação do modelo MGB, a primeira etapa da modelagem se refere à geração e obtenção dos dados de entrada, para em seguida ser realizada a calibração do modelo e análise dos resultados.

### 3.4.1 Dados de entrada

Antecipadamente à utilização do modelo, há a necessidade de geração de mapas da região de trabalho como, por exemplo, mapas do relevo da região de estudo, drenagem da bacia e comprimento do rio. Para a bacia de Furnas estes mapas foram gerados pelas rotinas MGB-GIS com mapas de relevo SRTM, disponíveis para quase todo o Brasil, conforme EMBRAPA (2012), com resolução de, aproximadamente, 90x90m.

De forma complementar, foram obtidos mapas de solos e cobertura vegetal da região, sendo o primeiro obtido através do IGA (2012), e o segundo obtido através de classificação supervisionada de fotos de satélite com diferentes bandas de captação realizadas por Collischonn et al. (2007).

O desenvolvimento desta etapa tem a finalidade de fornecer informações ao modelo para calcular o balanço hidrológico dentro de cada pixel e, assim, estimar escoamentos superficiais responsáveis pela geração de vazão na calha.

#### 3.4.1.1 Delimitação da região de estudo

Para a delimitação da área de estudo, foram utilizadas as informações cartográficas disponíveis pelo EMBRAPA e pelo IBGE. As cartas cartográficas citadas acima foram unidas por meio do software

Idrisi Kilimanjaro e a partir deles foi traçada a área de drenagem a montante da barragem da usina de Furnas. Definido seu espaço necessário foi retirada uma janela para os estudos, entre as latitudes 22°56' S e 20,17° S e longitudes 46°43' O e 43°31' O, que permite a visualização da área de interesse. Além deste mapa, foram utilizados dois mapas, um com resolução de 100 x 100 m, sendo este de alta resolução, e um de 5x5 km, utilizado como mapa de baixa resolução.

A rede de drenagem de alta resolução foi obtida por uma rotina que atribui a cada pixel da imagem um valor de referência que indica para qual pixel vizinho seu escoamento se dá. O resultado desta rotina não é uma imagem possível de visualização, sendo retrabalhado posteriormente para adquirir um formato mais claro.

Após o resultado de direção de drenagem outra rotina é capaz de gerar a área acumulada da bacia hidrográfica montante a cada pixel. Um exemplo deste resultado encontra-se na Figura 3.12, sendo que quanto mais escura a tonalidade da cor azul, maior a área de drenagem montante.

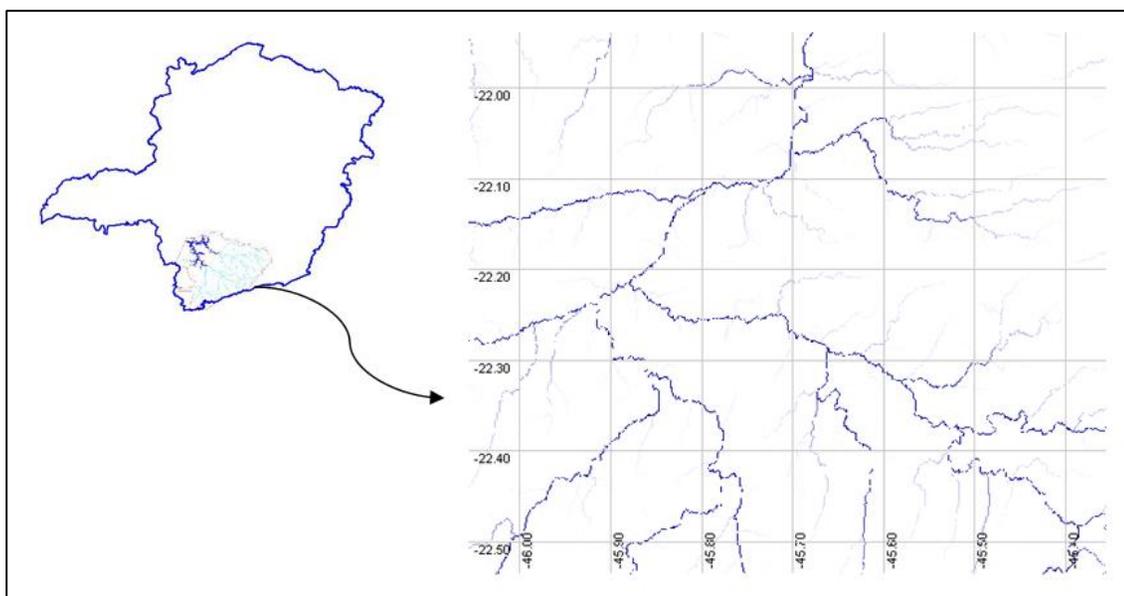


Figura 3.12: Exemplo da rede de drenagem de alta resolução da parte sul da bacia hidrográfica.

Esse resultado serve como referência para as rotinas seguintes na geração da drenagem de baixa resolução, obtido a partir da combinação do mapa topográfico de baixa resolução e o mapa de direções de fluxo de alta resolução, novamente sem uma visualização clara do resultado. A rotina que

segue é responsável pela geração da visualização vetorial do mapa gerado. Apesar da boa aproximação realizada pela rotina, existem células que necessitam de correção, pois células com direções incorretas podem apresentar distorções em relação à drenagem natural local, interligando sub-bacias e, conseqüentemente, gerando erros em cadeia, principalmente nos cálculos de comprimento do rio e área de drenagem.

Por fim, a bacia foi dividida em sub-bacias para que a calibração do modelo se dê em áreas menores, priorizando a precisão e a possibilidade de observar variações nos parâmetros de ajuste entre sub-bacias. A divisão foi estabelecida pela existência de postos fluviométricos, com séries de dados consistentes, sendo eles o exutório de cada sub-bacia. Nesta etapa houve novamente uma verificação da direção de fluxo das células, pois a área de cada sub-bacia deveria estar próxima àquela informada para os postos fluviométricos pela ANA.

#### 3.4.1.2 Definição da precipitação nas células

A obtenção dos dados de precipitação foi obtida conforme apresentado na seção 3.2. Para a distribuição da precipitação nas células do modelo foi adotada a seguinte rotina:

- 1 – para cada célula, observa-se qual o dado de informação pluviométrica que se encontra mais próximo;
- 2 – determina-se uma circunferência ao redor da célula com raio de 2 vezes a distância do postos mais próximo com dados;
- 3 – todos os postos dentro desta circunferência são utilizados para a geração da precipitação na célula, por meio de uma média ponderada pelo inverso do quadrado da distância.

Nesse processo é incorporada a variabilidade espacial da precipitação em cada intervalo de tempo. Como os processos de geração de escoamento são não lineares, é preferível evitar o uso das médias espaciais das precipitações, que tendem a atenuar os valores extremos.

### 3.4.1.3 Dados de Solo e de Uso e Ocupação

As informações relativas ao solo foram obtidas do IGA (2012), e esses foram delimitados para a área de estudo, gerando a Figura 3.13. O conhecimento de solo pelo modelo visa, principalmente, estimar a capacidade de infiltração, podendo proporcionar a estimativa do escoamento superficial e infiltração em cada célula.

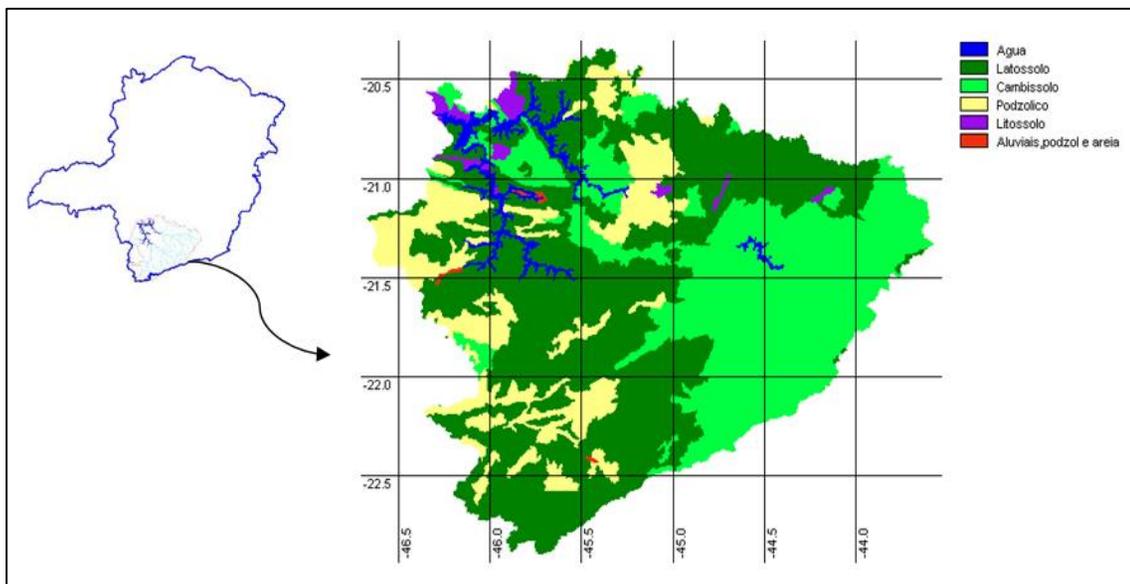


Figura 3.13: Solos da bacia de Furnas.

Para uso e ocupação, foi utilizada a classificação supervisionada realizada por Collischonn et al. (2007), em que foi realizada uma separação entre água, pastagem e solo exposto, agricultura e mata, conforme ilustrado pela Figura 3.14.

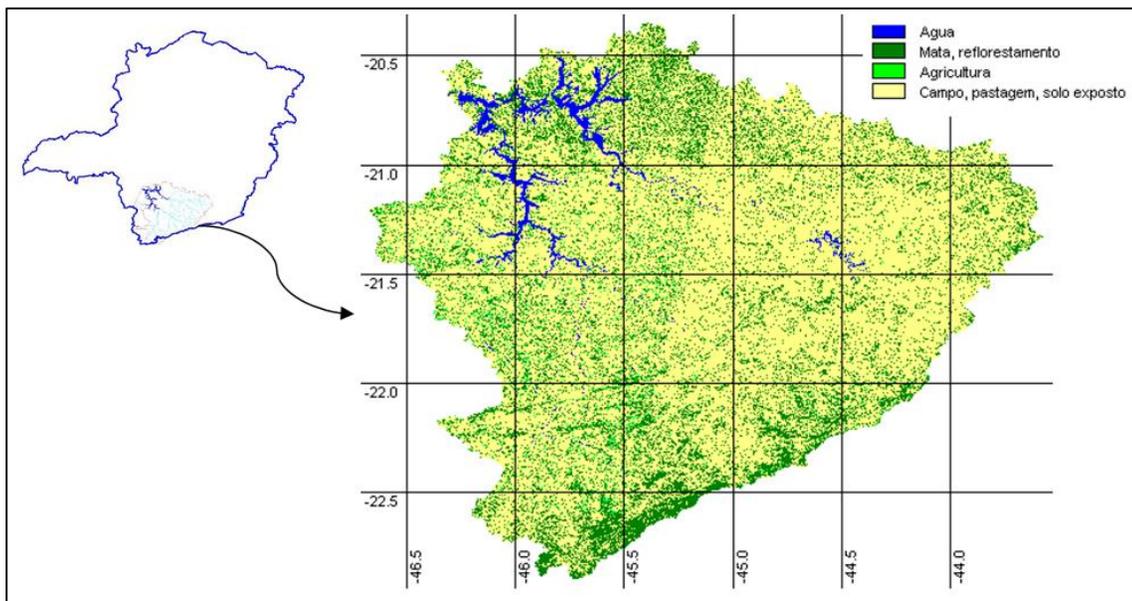


Figura 3.14: Uso e ocupação do solo na bacia de Furnas (COLLISCHONN, 2007).

O mapa de tipo de solo foi resumido para apenas três tipos de solos, de acordo com as características, segundo:

- solo com alta capacidade de infiltração: Neste critério se enquadrou o solo do tipo latossolo;
- solo com média capacidade de infiltração: Foram incluídos neste tipo os solos do tipo cambissolo, podzólico, aluviais, podzol e areia;
- solo com baixa capacidade de infiltração: Apenas o solo litossolo foi incluído nesta classificação.

Após a realização desta reclassificação dos tipos de solo, foi gerada uma única imagem, contemplando os mapas de solo e uso e ocupação, com blocos pré-determinados reconhecidos pelo modelo.

São eles:

- 1 – Pastagem/Campo/Agricultura/Solo Exposto + Solo de média capacidade de infiltração;
- 2 – Agricultura/Mata + Solo de alta capacidade de infiltração;

- 3 – Todas coberturas com solos de baixa capacidade de infiltração;
- 4 – Mata + Solo de média capacidade de infiltração;
- 5 – Pastagem/Solo Exposto + Solo de alta capacidade de infiltração;
- 6 – Água.

### 3.4.2 Utilização e calibração do modelo

Utilizando-se as informações apresentadas nas seções anteriores é possível executar o modelo MGB-IPH, para uma estimativa das vazões e calibrar os parâmetros necessários.

Deve-se definir o intervalo de tempo dos dados utilizados para calibração e o intervalo para verificação. O intervalo de 1968 a 1990 cuja disponibilidade de dados é bastante abrangente na bacia, pré-definido foi dividido em duas séries. A primeira engloba os anos de 1968 a 1980, utilizados para calibração, e a outra de 1981 a 1990, utilizada para a validação da calibração realizada. De forma complementar, deve ser mencionado que esse período foi selecionado por ser o período condizente com o período de validação utilizado pelo IPCC, para validação e ajuste dos modelos climáticos.

Inicialmente, foi realizada uma calibração manual dos parâmetros, depois foi feito um ajuste fino por uma rotina. Os parâmetros para verificação da qualidade da calibração são: erro de volume ( $\Delta V$ ), coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e também o coeficiente logaritmo deste último (NSlog).

$$\Delta V = \frac{\Sigma Q_{calc}(t) - \Sigma Q_{obs}(t)}{\Sigma Q_{obs}(t)} \quad \text{(Equação 3.12)}$$

$$NS = 1 - \frac{\Sigma [Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t)]^2}{\Sigma [Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}}]^2} \quad \text{(Equação 3.13)}$$

$$NS \log = 1 - \frac{\Sigma [\log Q_{obs}(t) - \log Q_{calc}(t)]^2}{\Sigma [\log Q_{obs}(t) - \overline{\log Q_{obs}}]^2} \quad \text{(Equação 3.14)}$$

Sendo:

$Q_{calc}$  – Vazão calculada pelo método em determinado t, em m<sup>3</sup>/s;

$Q_{obs}$  – Vazão observada em postos fluviométricos em t, em m<sup>3</sup>/s;

$\overline{Q}_{obs}$  - Vazão média observada, em m<sup>3</sup>/s.

O coeficiente de NS representa a proximidade dos hidrogramas gerados com as leituras nos postos fluviométricos, especialmente nos picos de vazão.

O coeficiente logaritmo de NS se assemelha ao último, porém com especial atenção às baixas vazões. O erro de volume é calculado pela diferença de áreas sobre os hidrogramas, que é interessante para análise na geração de energia de usinas, por exemplo. Todos os três índices são expressos em percentuais, lembrando que esses ajustes devem ser realizados para cada sub-bacia definida e devem ser realizados de montante para jusante. Valores de NSlog maiores que 0.6 podem ser considerados bons valores, ou seja, a calibração ficou boa, sendo toleráveis valores por volta de 0.5.

### 3.5 Aplicação dos cenários climáticos do modelo Eta

As representações do clima presente e futuro são retratadas por projeções numéricas dos modelos climáticos. Contudo, na maioria das vezes, os modelos não são capazes de representar de forma perfeita todos os fenômenos e processos climáticos, devido à influência da discretização espacial dos modelos, de modo que a representação do clima se apresenta distorcida em relação aos dados medidos.

De modo geral, essas diferenças são ocasionadas por erros sistemáticos, os quais devem ser removidos para que se não se propaguem equívocos nas projeções de vazões.

Sendo assim, as seis variáveis climatológicas projetadas pelo modelo Eta serão corrigidas nos períodos: 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, para os quatro membros climáticos, descritos na seção 2.1.

Após a consistência dos dados climáticos, esses servirão de base para alimentar o modelo hidrológico MGB, tendo como resultado as séries de vazões de Furnas, sob o efeito do clima do presente e do futuro.

### 3.5.1 Aplicação da técnica do *downscaling*

O custo computacional para projeções climáticas com um modelo global de resolução fina é muito elevado. O clima regional pode ser controlado por fatores físicos, que podem ser de escala espacial bem menor. As características físicas como a topografia, tipo de vegetação, distribuição terra/água podem causar significativa influência no clima regional, como por exemplo, a Serra do Mar ou da Mantiqueira, que são importantes formações geológicas, podem passar “despercebidas” ou o modelo não consegue representar essas montanhas, dependendo da escala da grade do modelo Global.

Como solução a esse entrave, será aplicada a técnica do "*downscaling*", que consiste na técnica de adensamento, em que se utiliza um modelo atmosférico de resolução mais alta (modelo regional), alimentado nas fronteiras pelas condições produzidas pelo modelo global.

Com intuito de melhorar a representação do clima e dos processos físicos para uma determinada região, os modelos regionais estão sendo desenvolvidos cada vez mais por meio de metodologias diversas.

O modelo Eta vem sendo utilizado pelo INPE como modelo de previsão de tempo e do clima sazonal. A versão climática sazonal desse modelo foi adaptada para executar integrações com intervalos de tempo decadal, com o foco no estudo de cenários de mudanças climáticas. O modelo Eta foi alinhado com o modelo global HadCM3, com uma resolução de 40 km na horizontal e com 38 camadas na vertical.

### 3.5.2 Determinação dos cenários

Para a confecção das projeções climáticas futuras do modelo, a concentração de CO<sub>2</sub> foi mantida constante, dentro dos parâmetros do cenário A1B do IPCC (NAKICENOVIC et al., 2000). O cenário A1B é o cenário que representa o desenvolvimento futuro mais próximo do presente que vivenciamos, ou seja, com condições “médias”, não tão pessimista (aumento acelerado do consumo de combustíveis fósseis, destruição e nenhuma ou muito pouca preocupação ambiental, etc.) e também não é tão otimista (só utilizaremos energia renovável por termos uma preocupação exagerada com o meio ambiente, etc.).

A partir dessa definição do cenário de emissão de gases que potencializam o efeito estufa, foram feitas perturbações em alguns parâmetros do modelo, a fim de gerar os cenários ou membros diferentes dentro do modelo Eta. Essas perturbações nos parâmetros têm a mesma função da variação dos cenários de emissões de gases que outros modelos, ou seja, o modelo Eta simulará diferentes projeções climáticas futuras para cada caso.

Após a perturbação dos parâmetros do modelo Eta, o resultado foi a geração de centenas de membros, dentre os quais foram escolhidos apenas três, que apresentaram: alta, média e baixa (*high, medium, low*) sensibilidades na resposta da temperatura média global futura. Juntamente foi feito um membro sem nenhuma perturbação caracterizado como Controle. Esses quatro membros fornecem as condições de contorno futuras para a condução de múltiplas realizações do modelo Eta. Para se estabelecer uma ligação ou verificação com os dados observados, foram simulados os dados para o período 01/01/1961 a 30/12/1990, representando o clima do presente, conforme metodologia apresentada por Chou et al. (2011).

Os três períodos futuros vão de 01/01/2011 até 30/12/2040, 01/01/2041 até 30/12/2070 e 01/01/2071 até 30/11/2099, sendo que o calendário do modelo Eta é de 30 dias mensais, de modo que cada ano tenha 360 dias e foi realizado dessa forma, pois o modelo Global também possui o calendário de 360 dias anuais.

### 3.5.3 Ajuste e verificação para o período 1960-1990

Considerando que os modelos climáticos não conseguem representar perfeitamente o clima atual e que seus resultados apresentam erros, é necessária a remoção desses erros sistemáticos (*bias*) para cada uma das variáveis do clima, das projeções geradas pelo modelo Eta-40, utilizando metodologias distintas, que foram baseadas na análise do comportamento dos erros e também em função da discretização espacial e temporal dos dados.

#### 3.5.3.1 Correção dos erros de precipitação

A metodologia utilizada para remoção de erros na precipitação foi apresentada por Bárdossy e Pegram (2011) e é denominada por Mapeamento quantil-quantil (*Quantile-Quantile mapping*). Essa metodologia está baseada na comparação das curvas de probabilidade acumulada (curvas que mostram a probabilidade da variável ser menor ou igual a um determinado valor) da variável observada e da variável estimada por um modelo climático no período atual e futuro. Nesse caso, a variável analisada é a precipitação diária. O método aplicado seguiu o procedimento que se descreve a seguir.

Os dados diários do modelo climático para o período atual são agrupados mensalmente e estimadas as curvas de probabilidade acumulada para cada célula do modelo hidrológico. Dessa forma, são obtidas 12 curvas de probabilidade acumulada. O mesmo procedimento é adotado considerando o modelo climático com os dados do período futuro, bem como para os dados diários observados.

Para remoção de *bias* para as precipitações identificadas no modelo Eta do clima atual, é identificado na curva de probabilidade acumulada para cada valor diário, pertencente ao mês do ano para o qual foram estimadas, o valor da probabilidade acumulada. Posteriormente, o valor diário corrigido será igual ao valor observado que apresenta o mesmo valor de probabilidade acumulada, da série observada, conforme se apresenta na Figura 3.15.

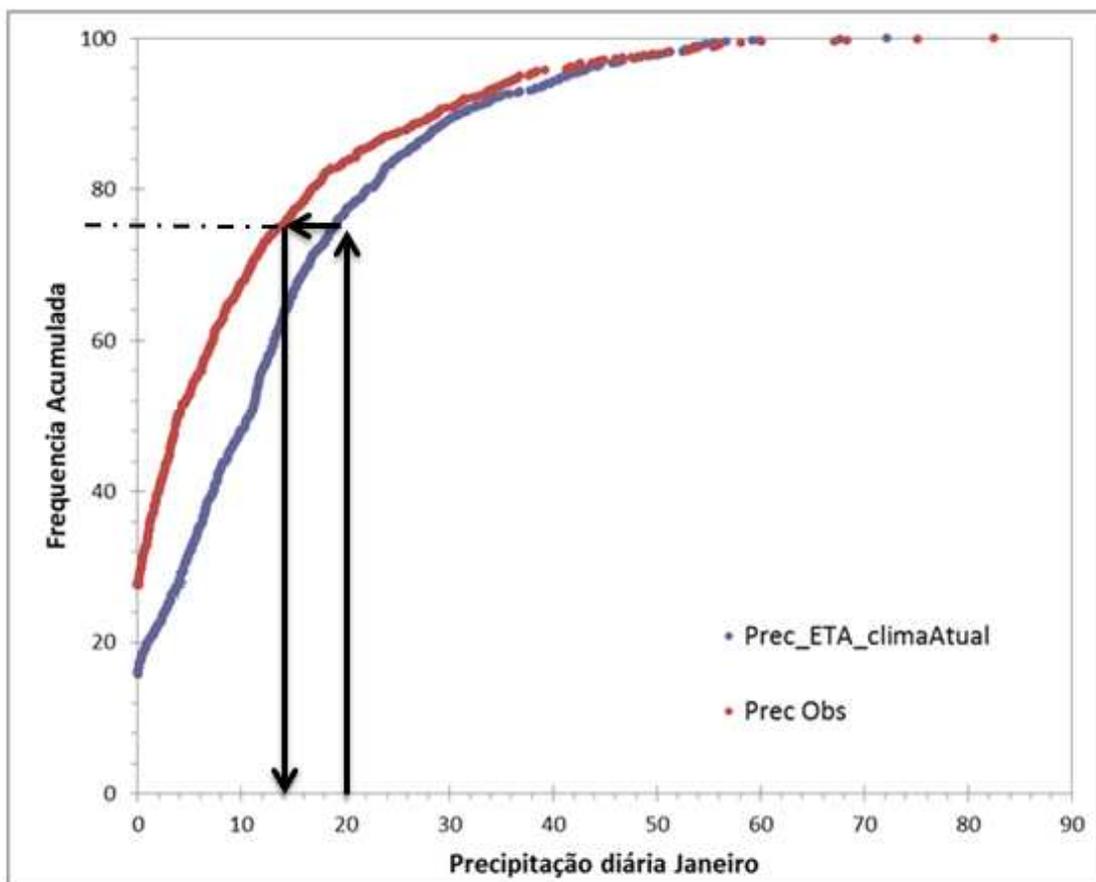


Figura 3.15: Procedimento de remoção de *bias* no período atual.

Nesse exemplo, a precipitação diária de 20 mm registrada pelo modelo global Eta para o período atual no mês de janeiro apresenta uma probabilidade acumulada de 76% (24 % dos valores foram maiores ou iguais a 20 mm no mês de Janeiro). Esta mesma probabilidade acumulada (76%) equivale a 14 mm da precipitação observada. Desse modo, pode ser verificado que houve um desvio superestimado de 6 mm no valor da precipitação.

Para o período futuro, o procedimento adotado foi semelhante, ou seja, para cada valor diário da série futura da variável analisada, pertencente ao mês do ano para o qual foram estimadas as curvas de probabilidade acumulada, é identificado o valor da probabilidade acumulada na série atual do modelo climático. Posteriormente, o valor diário corrigido no período futuro é igual ao valor observado que apresenta o mesmo valor de probabilidade acumulada (Figura 3.16).

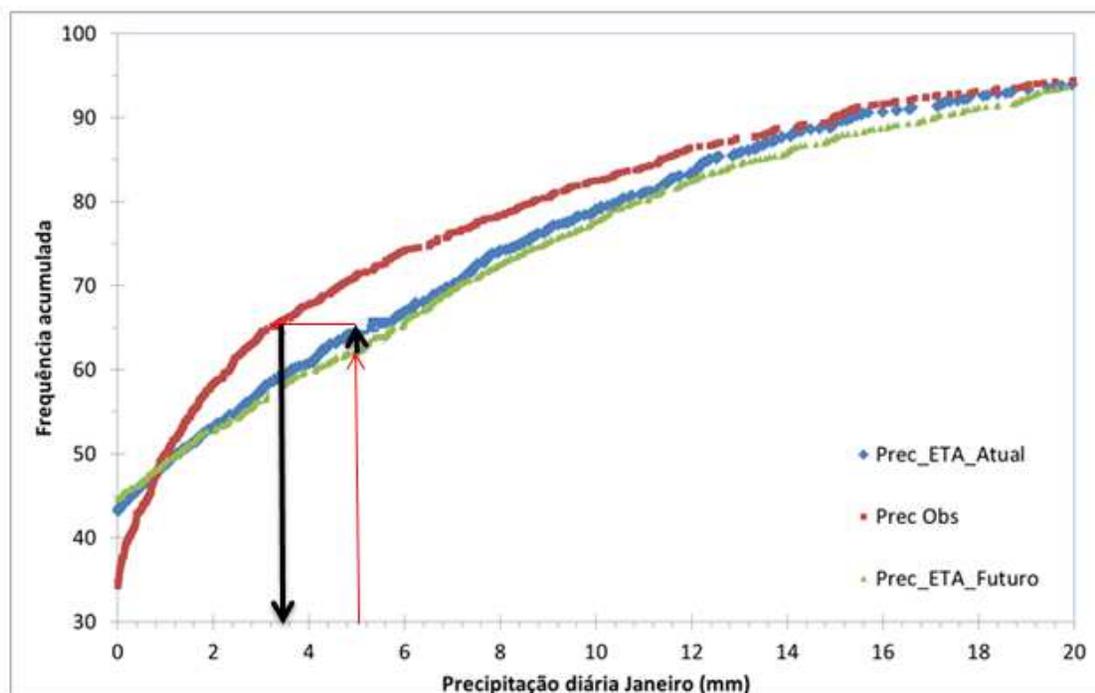


Figura 3.16: Procedimento de remoção de bias no período futuro.

Nesse gráfico, a precipitação diária sem corrigir, para o Eta futuro, considerando um valor de 5,0 mm, apresenta uma probabilidade acumulada de 60 % no período futuro e 65% no período atual (65% dos valores foram menores ou iguais a 5,0 mm no mês de Janeiro). A projeção da probabilidade acumulada de 65 % na curva da precipitação observada representa uma precipitação de aproximadamente 3,3 mm, o que significa uma diferença de 1,7 mm.

O método foi aplicado utilizando as séries temporais de precipitação estimadas no centro de cada uma das células existentes na região de estudo. O procedimento de remoção dos erros sistemáticos foi aplicado, de forma independente, aos valores de precipitação estimados pelos diferentes membros do modelo Eta-40 (CTRL, LOW, MID e HIGH).

### 3.5.3.2 Correção dos erros sistemáticos das demais variáveis climatológicas

Para correção dos erros sistemáticos presentes nas demais variáveis climatológicas do modelo Eta (vento a 10 m, temperatura a 2 m, pressão atmosférica, umidade relativa e radiação solar), empregou-se a metodologia de remoção de bias denominada escalonamento linear (*Linear Scaling*), apresentada por Lenderink et al. (2007). Essa metodologia está baseada no cálculo de um coeficiente de correção a partir das diferenças entre as normais climatológicas observadas e estimadas pelos modelos climáticos no período atual. Esse mesmo coeficiente é posteriormente utilizado na remoção dos erros sistemáticos nos períodos futuros. O método aplicado seguiu o procedimento que se descreve a seguir:

1. para os dados do modelo climático no período atual, foi realizado o cálculo dos valores das normais climatológicas a partir da série temporal estimada;
2. cálculo dos valores das normais climatológicas a partir dos valores observados;
3. para cada mês e ano, foi realizada a estimativa do coeficiente de correção, que é o quociente entre os valores das normais climatológicas observadas e dos modelos climáticos;
4. o próximo passo é a remoção dos erros sistemáticos da série temporal da variável climatológica para o período futuro, que é feito por meio da multiplicação dos valores diários da série pelos coeficientes estimados em 3, ou seja, todos os valores diários do mês de janeiro são multiplicados pelo coeficiente de correção de janeiro, todos os valores diários do mês de fevereiro são multiplicados pelo coeficiente de correção de fevereiro. Esse procedimento é realizado até todos os dados estarem corrigidos;
5. verificação de que os valores diários da série temporal corrigida não superem limites físicos, como por exemplo, umidade relativa do ar superior a 100%. Caso os limites físicos fossem superados, o valor da variável naquele dia é limitado ao valor do limite físico.

O método foi aplicado para cada uma das variáveis climatológicas: temperatura, pressão atmosférica em superfície, umidade relativa do ar, vento em superfície e radiação de onda curta incidente em superfície, utilizando as séries temporais estimadas no centro de cada uma das células existentes nas bacias analisadas.

O procedimento de remoção dos erros sistemáticos foi aplicado, de forma independente, aos valores das variáveis climatológicas estimados pelos diferentes membros do modelo Eta-40 (CTRL, LOW, MID e HIGH).

### 3.5.3.1 Verificação dos cenários de vazão para os períodos futuros (2010-2100)

Após a interpolação dos dados do modelo Eta, para a resolução do modelo hidrológico, o próximo passo é verificar se o modelo consegue representar a sazonalidade do clima atual, de modo a descrever os ciclos hidrológicos, ou seja, períodos úmidos (cheia) e secos (estiagem) e verificar se esses são coincidentes (Figura 3.17). Deve ser observado que essa etapa tem o objetivo de analisar o comportamento da curva e não a magnitude dos valores.

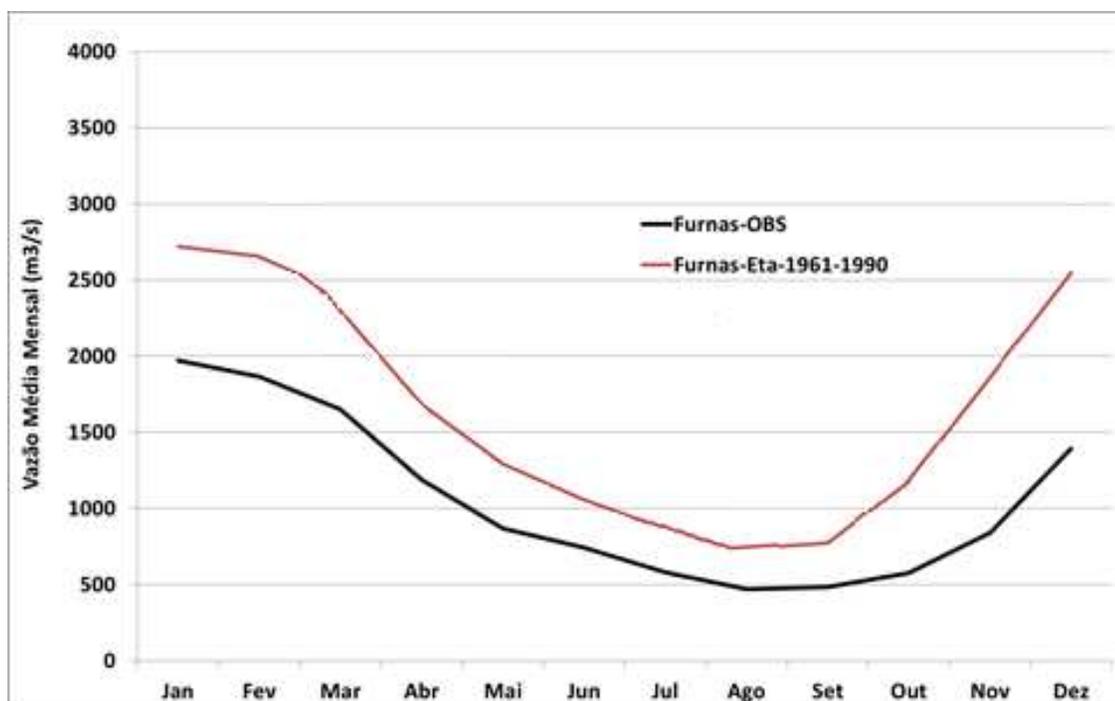


Figura 3.17: Comparação da vazão média mensal observada (1961-1990) com as projeções do modelo Eta, para a sub-bacia de Furnas.

Ao analisar a Figura 3.17, nota-se que o modelo consegue representar bem o comportamento das vazões, para o período de validação, apesar de apresentar uma superestimativa ao longo de todo o período, ou seja, o modelo apresenta um erro sistemático ou “bias”.

Esse erro pode ser removido de acordo com a metodologia descrita anteriormente, de tal modo que o hidrograma teria o comportamento que se representa na Figura 3.18, sendo que a correção é feita mensalmente para todas as células da bacia.

Após a calibração e verificação da calibração do modelo hidrológico, o próximo passo é gerar as séries de vazões baseados nas projeções futuras do modelo Eta. Os arquivos de vazões foram divididos em vazões médias mensais (média dos 30 dias) e vazões diárias, lembrando que cada mês do modelo Eta possui 30 dias, totalizando 360 dias cada ano. Os arquivos foram divididos para cada período (1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099) e para cada membro do modelo Eta (M1-Controle, M2-Low, M3-Médio e M4-High).

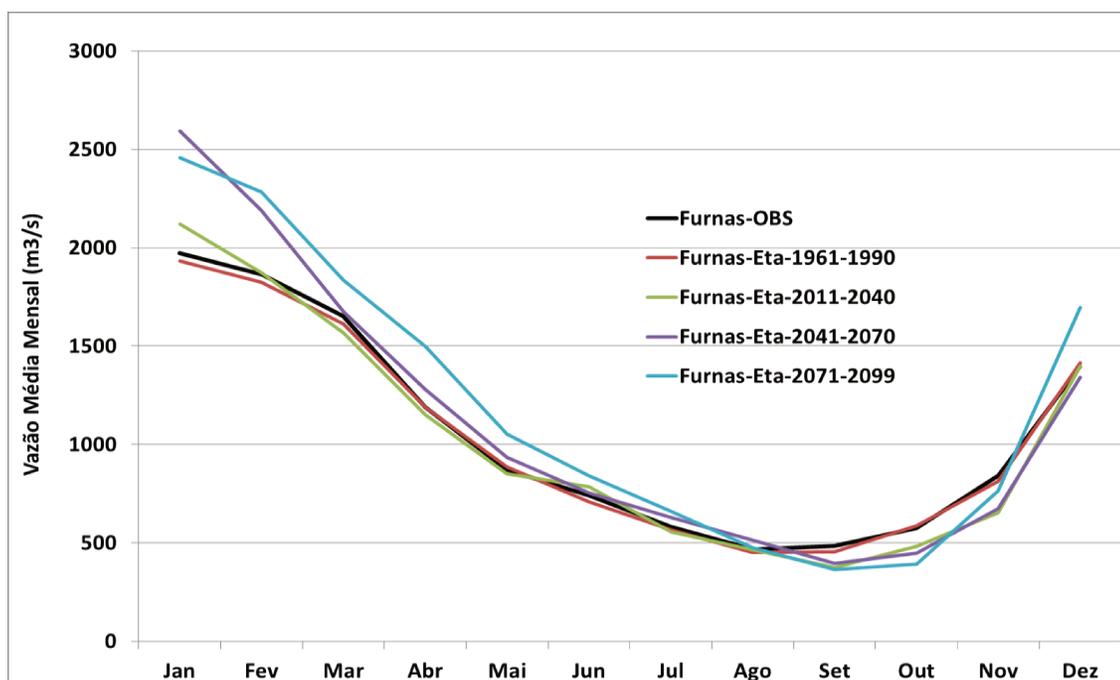
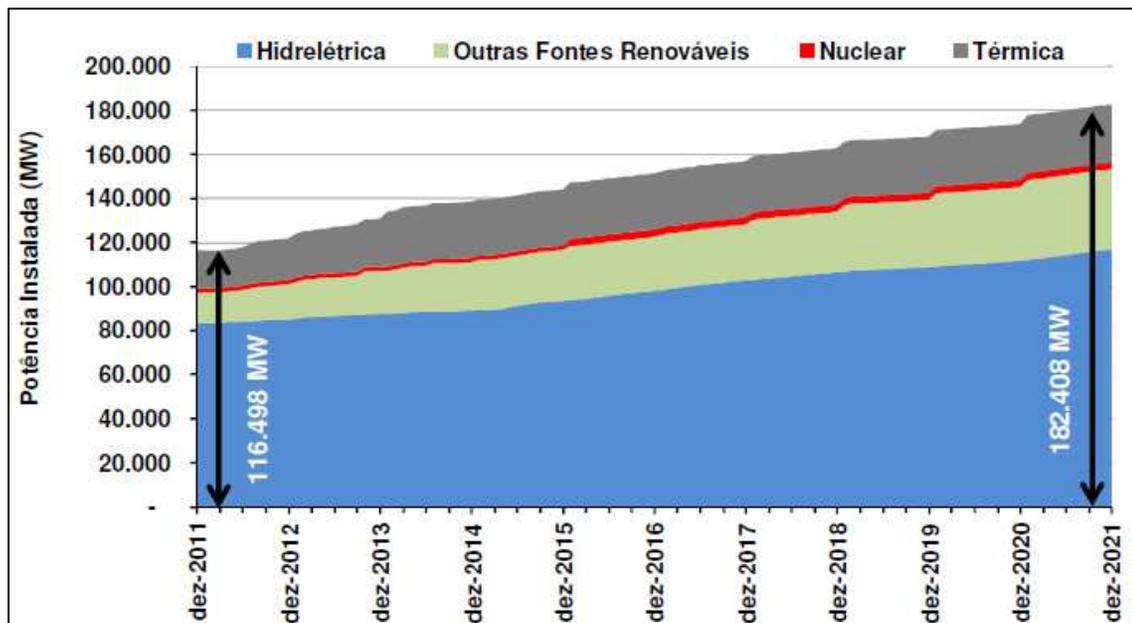


Figura 3.18: Vazões médias mensais para todos os períodos na sub-bacia de Furnas, sem os erros sistemáticos.

Conforme se observa na Figura 3.18, acima, a correção consegue remover os erros sistemáticos das projeções futuras, principalmente para o período presente (1961-1990).

### 3.6 Modelo de operação dos reservatórios

Mediante pesquisas sobre mudanças climáticas aliadas às projeções da EPE (Figura 3.19), que demonstram a importância hídrica para o Sistema Interligado, fator esse que pode implicar maior dependência dos reservatórios e conseqüentemente maior esvaziamento do lago, para atendimento à demanda de energia; verifica-se a necessidade de desenvolver um modelo que concilie os usos múltiplos da água, conforme preconiza a lei 9.433/97, atendendo aos interesses das populações a jusante (com interesse na regularização de vazões) e a montante (interessada na manutenção dos níveis dos reservatórios), contrapondo o modelo atual, que salvo algumas restrições impostas, tem como único objetivo a geração de energia.



Fonte: EPE (2012).

Figura 3.19: Evolução da capacidade instalada hidrotérmica do SIN (MW).

Como as usinas hidrelétricas são construídas onde melhor se aproveitam as condições de relevo e hidrologia, grande parte distante do centro consumidor, foi necessário desenvolver um sistema de transmissão, formando caminhos alternativos, permitindo transportar a energia produzida até os centros de consumo. Segundo informações obtidas em ONS (2013), o sistema de produção e transmissão de energia

elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados, principalmente na região amazônica.

Neste estudo é proposta uma nova metodologia de operação de reservatório, mostrando que é possível, operar empreendimentos hidrelétricos, conforme já estabelecia o Código de Águas (Decreto nº 24.643 de 1934, substituído pela atual Política Nacional de Recursos Hídricos a “Lei das Águas”, Lei 9433/97), que em seu Artigo 143, instituía que todos os aproveitamentos de energia hidráulica deveriam satisfazer as exigências acauteladoras dos interesses gerais como: alimentação e necessidades das populações ribeirinhas, salubridade pública, irrigação, proteção contra as inundações, conservação e livre circulação do peixe, o escoamento e rejeição das águas. Deveria, ainda, atender a outros aspectos tais como beleza cênica e paisagística do rio, beneficiando tanto a população do entorno como os usuários que se localizassem adiante da casa de máquinas, com vazões regularizadas, assim como garantir que não haveria perda de energia ao sistema (RIBEIRO JUNIOR, 2004).

### 3.7 O Modelo

Historicamente, a geração hidrelétrica no Brasil era responsável por quase a totalidade da produção elétrica, não havendo complementaridade térmica sensível por falta de capacidade instalada e pelos altos custos. Nos sistemas em que a geração termelétrica é significativa, não se exige grande regularização dos reservatórios para fins energéticos. De forma complementar, a capacidade de regularização vem diminuindo com a entrada de novas hidrelétricas a fio d’água, associadas à grande expansão das energias renováveis, principalmente dos parques eólicos, e maior diversificação da matriz energética.

Logo, contar com a “automatização” dos reservatórios para esse fim tem se tornado de menor importância. O que se observa são mudanças de critérios na operação eletro-energética, respeitando, de

forma mais objetiva, os interesses locais, que são e serão certamente impostos por Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs) bem organizados, conforme apresentado no Capítulo 2.

Uma adaptação do trabalho de Ribeiro Junior (2004) apresenta-se neste modelo, que considera uma regra operativa que contemple o tempo e o ciclo de atendimento a uma determinada cota (nível do reservatório), para que se atenda não somente a geração de energia, mas que se possa garantir a sustentabilidade dos usos múltiplos. Para tanto é necessária a definição dos seguintes conceitos:

Duração ( $d$ ): representa o número de meses que ocorrem cotas inferiores ao nível de referência, em um determinado período específico.

Frequência ( $f$ ): representa o número de ciclos (períodos) existentes que estejam abaixo de um nível de referência, em um determinado período específico.

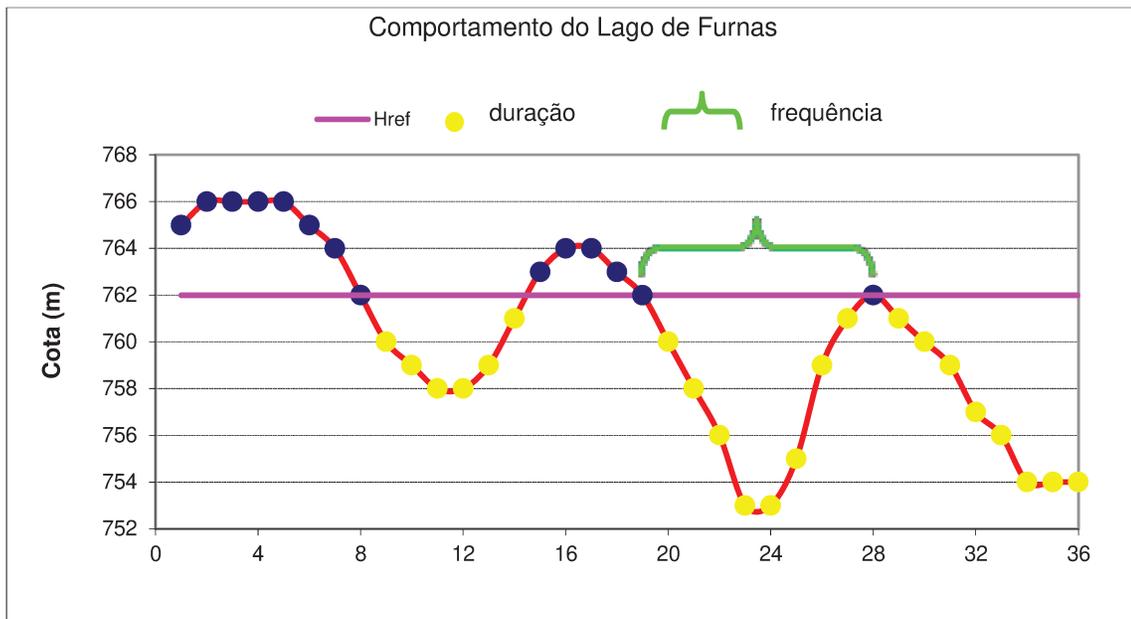
Duração de transgressão ( $dt$ ): é a relação existente a Duração ( $d$ ) e a Frequência ( $f$ ).

$$dt = \frac{d}{f} \quad \text{(Equação 3.15)}$$

Frequência de transgressão ( $\overline{ft}$ ): relação existente entre a frequência ( $f$ ) e o tamanho da amostra ( $n$ ):

$$\overline{ft} = \frac{f}{n} \quad \text{(Equação 3.16)}$$

Para melhor fixação dos conceitos, na Figura 3.20 ilustra-se a variação do reservatório de Furnas entre 1998 e 2000.



Fonte: Ribeiro Junior (2004).

Figura 3.20: Reservatório de Furnas entre 1998 e 2000.

Assim, analisando os 36 meses em estudo e tendo como referência a cota 762 temos:

Duração ( $d$ ): 22 meses abaixo da cota 762.

Frequência ( $f$ ): 3 períodos.

Duração de transgressão ( $dt$ ):  $dt = \frac{d}{f} = \frac{22}{3} = 7,33$  meses por período.

Frequência de transgressão média ( $\overline{ft}$ ):  $\overline{ft} = \frac{f}{n} = \frac{3}{36} = 0,083$  período/mês.

### 3.8 Aplicação do modelo

Para o emprego da metodologia, tendo como referência os conceitos de duração e frequência, são adotados os seguintes procedimentos:

1. Considerando os dados de vazão afluente projetados pelo MGB e que foram alimentados pelo modelo Eta por meio do cenário A1B do IPCC, para o período de 2012 – 2100 (optou-se por iniciar em 2012 pelo fato de já se dispor dos dados observados de 2011) , divididos em três triênios, 2012 - 2040; 2041 - 2070 e 2071 – 2099, foram realizadas projeções de níveis e vazões defluentes, de acordo com as seguintes hipóteses:
  - a. para o período futuro (2011 – 2100), a UHE Furnas tentará manter o histórico médio mensal de produção de energia entre 1963 e 2011, ou seja, as vazões defluentes e o nível do reservatório serão determinados em função da produção de energia e da vazão afluente, ou,
  - b. a UHE de Furnas (para período de 2011 – 2100) terá que conciliar os interesses dos usuários de montante e jusante, conforme apresentado por Ribeiro Junior (2004). Neste caso, em função das séries de vazão afluente e defluente programadas, será projetada a produção de energia.
2. Tomando como parâmetro que o pleito por uma cota mínima para o lago ocorreu após 1997, foi considerado que no período anterior (1963 a 1997), a usina teve um ciclo de operação de forma a atender ao interesse de todos os usuários. Desse modo, calculam-se para este período, a duração ( $d_t$ ) e frequência ( $f_t$ ) de transgressão para a cota 762 (referência para os usuários do Lago) que serve de orientação para as projeções futuras.

Assim:

Duração (d): representa o número de meses que ocorrem cotas inferiores ao nível de referência, deste modo, (d) = 99 meses, no período de 1963 – 1997.

Frequência (f): representa o número de ciclos (períodos) existentes que estejam abaixo do nível de referência, sendo assim (f) = 13, no período de 1963 – 1997.

Duração de transgressão (dt): é a relação existente entre a Duração (d) e a Frequência (f).

$$dt = \frac{d}{f} = 99/13 = 7,62 \text{ (meses/período)}$$

Frequência de transgressão ( $\overline{ft}$ ): relação existente entre a frequência (f) e o tamanho da amostra (que neste caso é equivalente a 412 meses no período de 1963 a 1997):

$$\overline{ft} = \frac{f}{n} = 13/412 = 0,032$$

3. Considerando como horizonte de planejamento o período de cinco anos (60 meses), determina-se a duração ( $d_d$ ) e frequência ( $f_d$ ) desejada para esse período, com base nos valores  $\overline{ft}$  e dt estimados na seqã 2.

$$\overline{ft} = \frac{f}{n} \Rightarrow f = 0,032 \times 60 = 1,89 \text{ (ciclos)}$$

Assim, neste intervalo de cinco anos, será permitida a transgressão abaixo da cota 762 apenas em dois ciclos.

Para a duração de transgressão (dt), têm – se:

$$dt = \frac{d}{f} \Rightarrow d = 7,62 \times 1,89 = 14,4 \text{ (meses)}$$

Deste modo, para que se pondere o interesse dos usuários do Lago do reservatório de Furnas, o ideal é que o reservatório fique apenas dois ciclos ( $f_d$ ) e um total de 15 meses ( $d_d$ ) abaixo da cota 762 m no intervalo de cinco anos.

4. Como o objetivo é fazer o planejamento da operação, para os últimos cinco anos (2007 – 2011), determina-se a duração ( $d_c$ ) e frequência ( $f_c$ ).
5. Caso as condições de duração e frequência sejam atendidas, ou seja,  $d_c \leq d_d$  e  $f_c \leq f_d$ , o reservatório tende a operar de forma a atender às premissas do item 1.
6. Se a duração e condições de frequência desejadas não forem atingidas, ou seja,  $d_c \geq d_d$  ou  $f_c \geq f_d$ , será adotada uma regra de operação para que o reservatório atinja níveis desejados, por meio do armazenamento de 15 % da vazão afluente (percentual adotado em função dos resultados obtidos no “modelo original”, pois percentuais maiores de armazenamento não trouxeram resultados significativos), sempre que o nível projetado esteja abaixo da cota 762 m, de modo que o reservatório possa atingir os patamares desejados. Após o armazenamento dessa quantidade de água, calcula-se a altura no próximo mês, e, então, considerando esse novo valor, calcula-se novamente a duração para os últimos cinco anos, ou seja, a frequência e duração devem atender às condições de operação considerando uma janela móvel de cinco anos.

O acúmulo de água maior do que o planejado continuará até que a duração calculada seja menor ou igual à desejada, dentro dos cinco anos. Quando isso acontecer, ou seja, a  $d_c \leq d_d$ , deve-se verificar se a frequência foi atendida.

Em caso afirmativo, a partir do próximo mês, a vazão defluente deverá ser a própria vazão planejada. Mas em caso contrário, ou seja, se a condição imposta para a duração for atendida, mas não para a frequência, não se faz necessário continuar acumulando água em quantidade maior que a planejada; assim, a proposta é que o nível do reservatório seja mantido constante até que a frequência desejada seja alcançada por meio da manutenção da defluência que será a mesma da afluência. Na Figura 3.21, apresenta-se um fluxograma da metodologia apresentada.

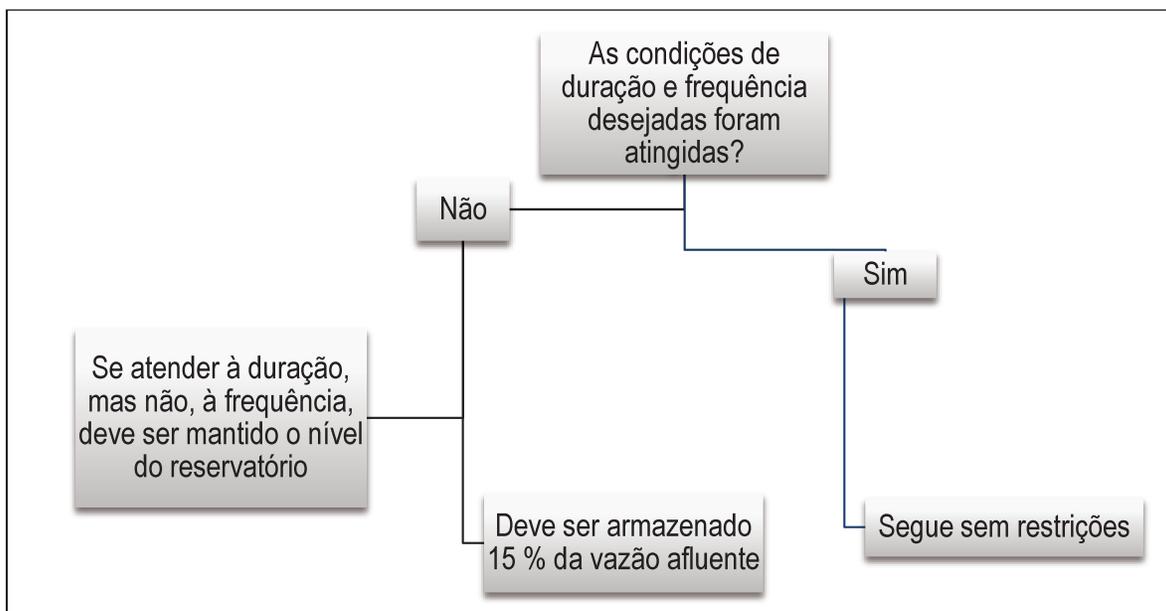


Figura 3.21: Fluxograma sugerido para atendimento aos conceitos de frequência e duração.

Para fins comparativos, na Tabela 3.1, apresenta-se um comparativo entre a concepção desenvolvida por Ribeiro Junior (2004) original da metodologia e a adaptação feita para este trabalho.

Tabela 3.1: Comparação entre os modelos de frequência e duração.

Item	“Modelo Original”	“Modelo Adaptado”
Projeção da Vazão Afluente	Por meio de método estocástico	Por meio do modelo hidrológico
Regras para operação dos reservatórios	Foco principal na conciliação dos interesses dos usuários de montante e jusante	Considera além dos interesses dos usuários, a geração de energia.
Restrições de níveis	Atendimento às condições de frequência e duração, considerando as cotas 761 m, 763 m, 766 m e 767 m	Atendimento às condições de frequência e duração, considerando a cota 762 m.
Horizonte de planejamento	30 anos	100 anos (projeção do IPCC)
Intervalo para atendimento às condições de frequência e duração (janela móvel)	10 anos	5 anos
Armazenamento de vazão defluente	10%, 15%, 20 % e 30 %	Não se aplica
Armazenamento de vazão afluente	10%, 15%, 20 % e 30 %	15 %
Quando não atende às condições de frequência e duração	Armazena um percentual da vazão afluente ou defluente	Armazena um percentual da vazão afluente apenas quando a vazão afluente é superior a defluente planejada

## 4 Resultado

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados com base na metodologia exposta no Capítulo 3, com base no referencial teórico descrito no Capítulo 2.

### 4.1 Detecção de tendência dos dados pluviométricos e fluviométricos

#### 4.1.1 Seleção dos postos pluviométricos

Uma vez determinada a região de estudo, a etapa subsequente foi pesquisar junto ao portal do Sistema de Informações Hidrológicas HydroWeb, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) (2012), as séries de dados para análise do comportamento do clima, começando pela precipitação que é a principal variável hidrológica de entrada do ciclo hidrológico. Desse modo, foram identificados 143 postos (Figura 4.1) que possuem boa distribuição espacial.

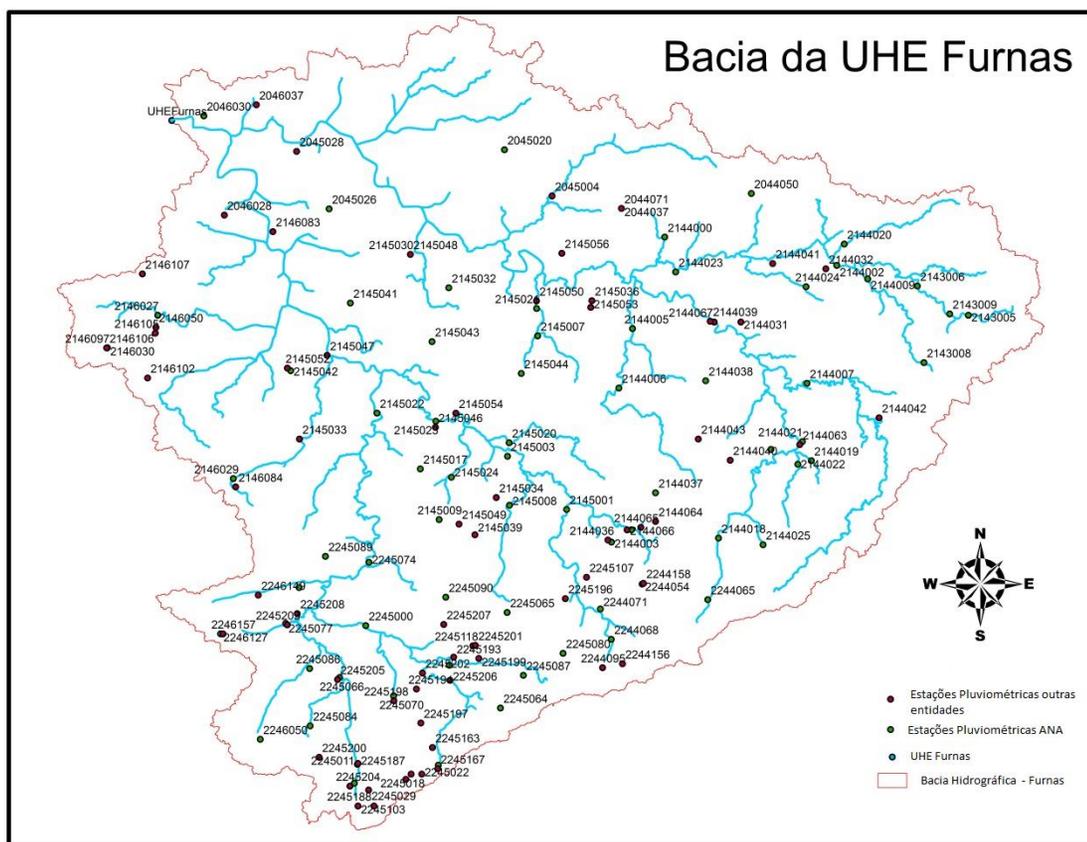


Figura 4.1: Postos Pluviométricos da Bacia de Furnas.

Desse montante, 45 não possuem dados disponíveis, o que diminuiu para 98 a quantidade de possíveis postos a serem estudados. Para análise hidrológica, dois fatores muito importantes devem ser considerados: a consistência (veracidade) das informações e a disponibilidade de dados, que deve ser superior a 30 anos de registros, fato esse que restringiu para 81 o espaço amostral, sendo que a maioria desses postos possui dados consistidos somente até o ano 2000.

Como um dos objetivos deste trabalho é o de realizar o prognóstico de vazões, tendo como base as projeções do IPCC, é importante que as séries de amostragem medidas contemplem ao menos o período de validação do IPCC, que vai de 1960 a 1990, de modo que seja possível fazer uma correlação entre a base de dados utilizada para validação e os dados existentes, que limitou para 45 o número de postos a serem estudados.

Por fim, o último filtro foi escolher os postos sem um número significativo de falhas, e que tivessem o maior período em comum de dados, o que resultou em 22 postos (Figura 4.2). Por se tratar de um estudo sobre a detecção de tendência dos dados, optou-se por não realizar o preenchimento de falhas, pois essa ação implicaria na transposição do comportamento de um determinado posto a outro, fato que poderia mascarar os resultados da análise.

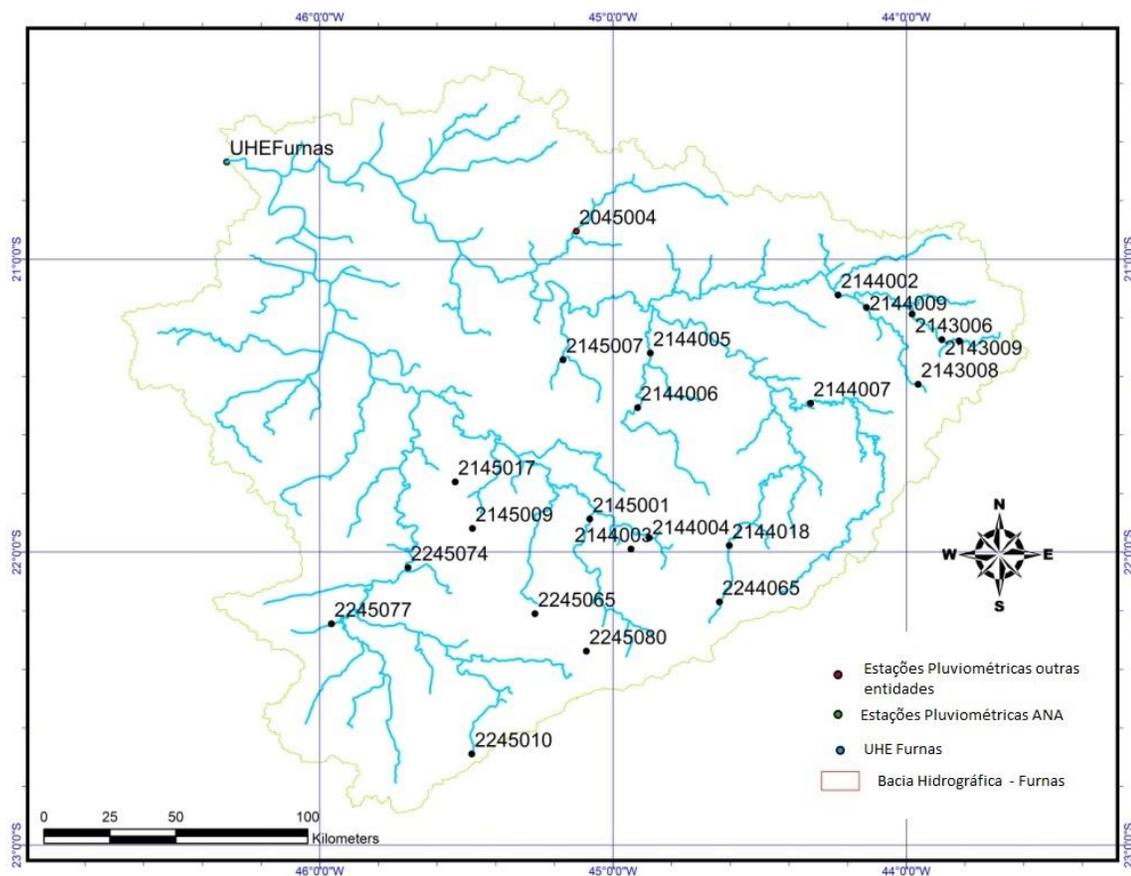


Figura 4.2: Postos pluviométricos selecionados para análise de tendência.

Conforme os critérios anteriormente citados, a análise de tendência convergiu para os postos apresentados na Tabela 4.1, abrangendo o período comum entre 1948 e 1998.

Tabela 4.1: Características dos postos pluviométricos selecionados.

Código	Nome	Município	Dados Brutos		Precipitação média anual (mm)
			1941	2011	
2045004	SANTANA DO JACARÉ	SANTANA DO JACARÉ	1941	2011	1290
2143006	BARROSO	BARROSO	1941	2011	1299
2143008	IBERTIOGA	IBERTIOGA	1941	2011	1174
2143009	USINA BARBACENA	BARBACENA	1941	2011	1395
2144002	PORTO TIRADENTES	TIRADENTES	1941	2011	1445
2144003	CAXAMBU	CAXAMBU	1941	2011	1361
2144004	BAEPENDI	BAEPENDI	1941	2011	1251
2144005	ITUMIRIM	ITUMIRIM	1941	2011	1495
2144006	LUMINARIAS	LUMINARIAS	1941	2011	1370
2144007	MADRE DE DEUS DE MINAS	MADRE DE DEUS DE MINAS	1941	2008	1472
2144009	PORTO DO ELVAS	TIRADENTES	1941	2011	1379
2144018	AIURUOCA	AIURUOCA	1943	2011	1530
2145001	CONCEIÇÃO DO RIO VERDE	CONCEIÇÃO DO RIO VERDE	1941	2011	1465
2145007	USINA COURO DO CERVO	LAVRAS	1941	2011	1372
2145009	USINA DO CHICÃO	CAMPANHA	1941	2011	1339
2145017	MONSENHOR PAULO	MONSENHOR PAULO	1941	2011	1360
2244065	ALAGOA	ALAGOA	1942	2011	1686
2245010	FAZENDA DA GUARDA (PARQUE)	CAMPOS DO JORDÃO	1941	2011	1657
2245065	CRISTINA - MONTANTE	CRISTINA	1941	2011	1525
2245074	CAREAÇU	CAREAÇU	1941	2011	1357
2245077	POUSO ALEGRE	POUSO ALEGRE	1941	2011	1358
2245080	VIRGÍNIA	VIRGÍNIA	1941	2011	1771

Desses postos, apenas o 2045004 não é operado pela ANA, sendo de responsabilidade de Furnas. Conforme se observa, os postos selecionados apresentam altos índices pluviométricos, que variam de 1174 a 1771 mm por ano, tendo como referência os 50 anos de estudos (1948 – 1998).

#### 4.1.2 Análise das séries temporais de chuva

Considerando o período de 1948 a 1998, foram aplicados os testes estatísticos mencionado no Capítulo 3, para os 22 postos pluviométricos selecionados. Para o teste de Mann Kendal, que considera, para a hipótese de estabilidade de uma série temporal, que a sucessão de valores ocorre de forma independente, e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma e adotando-se o nível de significância 5%, os postos pluviométricos que não obtiveram o valor Z contido no intervalo  $[-1,96;+1,96]$  estão destacados em cor vermelha na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados teste de Mann-Kendall.

Posto	Z	Posto	Z	Posto	Z	Posto	Z
2045004	0,536	2144004	3,817	2145001	2,518	2245065	2,664
2143006	2,307	2144005	1,413	2145007	0,666	2245074	1,803
2143008	3,834	2144006	0,032	2145009	3,460	2245077	0,390
2143009	0,682	2144007	0,065	2145017	1,072	2245080	2,924
2144002	0,325	2144009	0,958	2244065	1,397		
2144003	1,454	2144018	2,307	2245010	1,243		

Conforme apresentado na Tabela 4.2, pode ser verificado que oito postos apresentam tendências significativas de aumento das precipitações, sendo que esses postos estão concentrados nas partes mais altas da bacia, em regiões onde o índice de urbanização é baixo, fato esse que indica que o fenômeno existente pode ser uma alteração ou variabilidade do clima e não apenas um efeito pontual da ação antrópica. Outro fato que pode proporcionar aumento da precipitação está ligado ao aumento do desmatamento, que ocasiona diminuição da evapotranspiração, conforme observado por Muller et al. (1998).

O teste de Pettitt é um teste não paramétrico, descrito por meio da estatística  $U_t, T$  que verifica a quantidade de vezes que o número da primeira amostra é maior que um elemento da segunda. Do mesmo modo que no teste de Mann-Kendall, no teste de Pettitt foi adotado um nível de 5 % de significância, que representa um valor de 1,96. Após essa etapa, a estatística  $k(t)$  assume o maior valor absoluto dos fatores  $U_t, T$ ; indicando o ponto de mudança brusca do valor máximo de  $k(t)$ , quando esse for maior que o limite

crítico estabelecido. Na Figura 4.3 apresenta-se um exemplo de aplicação do método de Pettitt, para o município de Barroso.

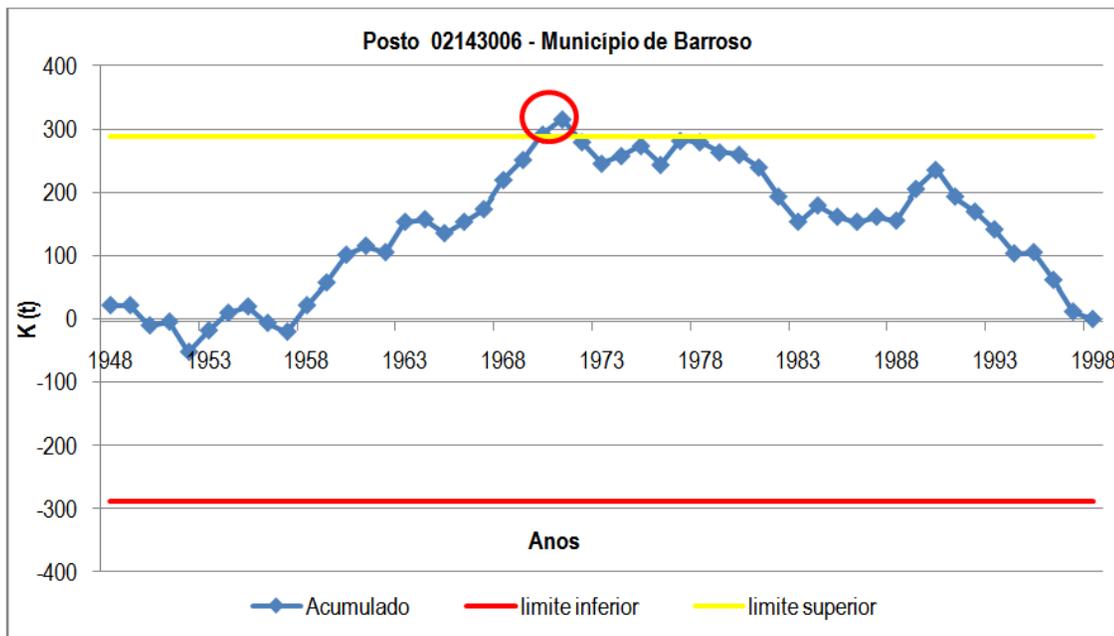


Figura 4.3: Resultados do teste de Pettitt para o posto pluviométrico – 02143006.

Nesse caso, pode ser observado que houve uma mudança no comportamento da série em 1970. Considerando que as séries possuem 51 anos de dados, o valor crítico é 288,37. Os postos que atingiram valores críticos fora desse intervalo são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Resultados teste de Pettit.

Posto	U (t)	Ano de ruptura	Posto	U (t)	Ano de ruptura
2143006	316	1971	2145001	312	1963
2143008	560	1970	2145009	462	1964
2144004	478	1971	2245065	289	1975
2144018	342	1975	2245080	506	1963

Conforme a Tabela 4.3, os postos que apresentaram tendência de elevação são os mesmos que foram identificados na metodologia de Mann-Kendall, o que reforça a tendência do comportamento destes

postos; contudo, esse método permite avaliar o ponto em que esta tendência de ruptura aconteceu. Nos postos em questão, as alterações concentraram-se no período de 1965 a 1975.

No teste de Run, que consiste em realizar a contagem do número de oscilações dos valores acima e abaixo da mediana, numa série de dados naturalmente ordenada, o número de oscilações é chamado de Run e deve-se testar se o valor observado está dentro da faixa de significância de 5 % (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Aplicação do teste de Run.

Posto	t	Posto	t	Posto	T	Posto	t
2045004	-1,27	2144004	-4,384	2145001	-0,705	2245065	0,427
2143006	-0,988	2144005	-1,271	2145007	-1,554	2245074	-2,969
2143008	-4,384	2144006	-1,271	2145009	-2,969	2245077	-0,422
2143009	-0,422	2144007	-0,705	2145017	-0,139	2245080	-5,233
2144002	1,276	2144009	-1,837	2244065	-1,271		
2144003	-1,837	2144018	-0,705	2245010	-0,139		

Pelo teste de Run, apenas cinco postos apresentaram tendência de elevação e apenas um desses postos (2245074) não havia apresentado esse comportamento, se comparado aos testes anteriores.

Como esse teste avalia o número de sequências em função da mediana, a identificação de tendências fica um pouco menos evidente.

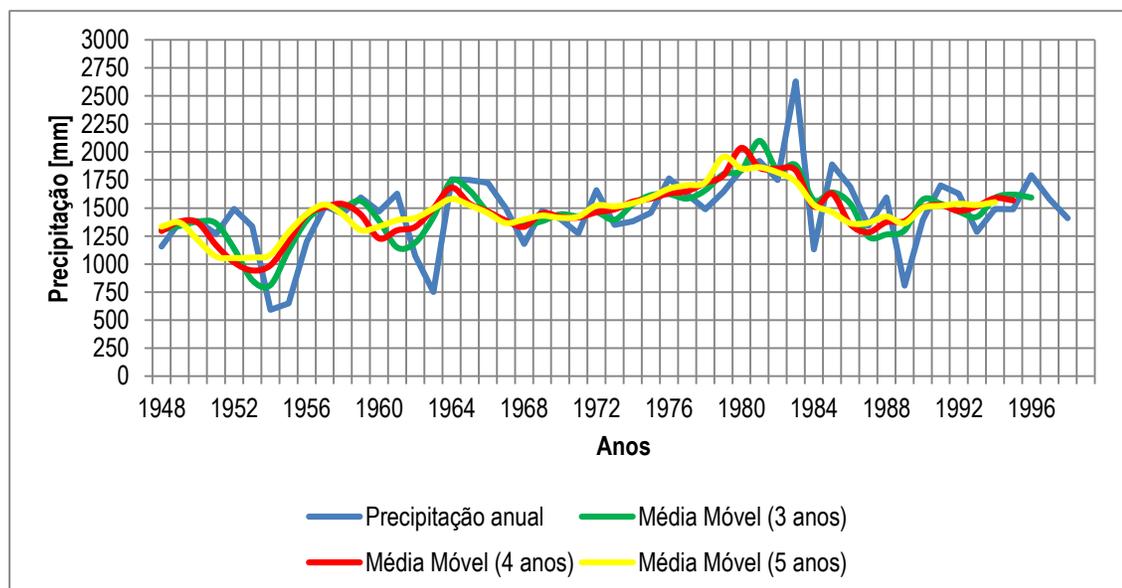
Já o teste de Spearman permite avaliar o coeficiente de correlação  $r$  entre duas variáveis  $X$  e  $Y$  e mede o grau de associação. Nesta fase do trabalho, em que se pretende avaliar o comportamento das séries de precipitação, a variável  $X$  representa o conjunto de dados hidrológicos em sua sequência natural, e a variável  $Y$  representa o ordenamento desses dados em ordem crescente. Na Tabela 4.5, apresenta-se o resultado para esse teste.

Tabela 4.5: Aplicação do teste de Spearman.

Posto	t	Posto	t	Posto	t	Posto	t
2045004	0,630	2144004	5,041	2145001	2,658	2245065	2,814
2143006	2,429	2144005	1,532	2145007	0,727	2245074	2,020
2143008	4,882	2144006	-0,086	2145009	3,906	2245077	0,220
2143009	0,725	2144007	0,011	2145017	1,080	2245080	3,676
2144002	0,340	2144009	0,705	2244065	1,448		
2144003	1,361	2144018	2,627	2245010	0,848		

O teste de Spearman confirmou a convergência de crescimento dos dados dos postos já identificados pelos testes anteriormente aplicados.

A técnica da média móvel é utilizada para analisar o valor médio de uma amostra em um determinado período. A expressão "janela móvel" diz respeito à média aritmética de certo número (n) das observações mais recentes. À medida que se realizam novas observações, abandonam-se as observações mais antigas. Esse estudo foi realizado considerando as janelas com passo de três, quatro e cinco anos (Figura 4.4).



Neste teste, apesar de a média móvel suavizar a curva, foi possível observar que as tendências detectadas nos testes anteriores se mantiveram.

A regressão linear também permite uma melhor visualização gráfica do comportamento das variáveis hidrológicas e pode ser utilizada para indicar alterações climáticas por meio do teste de significância do coeficiente angular. Considerando a equação da reta do tipo:  $Y = aX + b$ , o teste consiste em determinar o intervalo de confiança do coeficiente  $a$ , sendo que se esse intervalo não inclui o valor zero, a tendência é significativa (Figura 4.5). Os demais postos estão representados no Apêndice D.

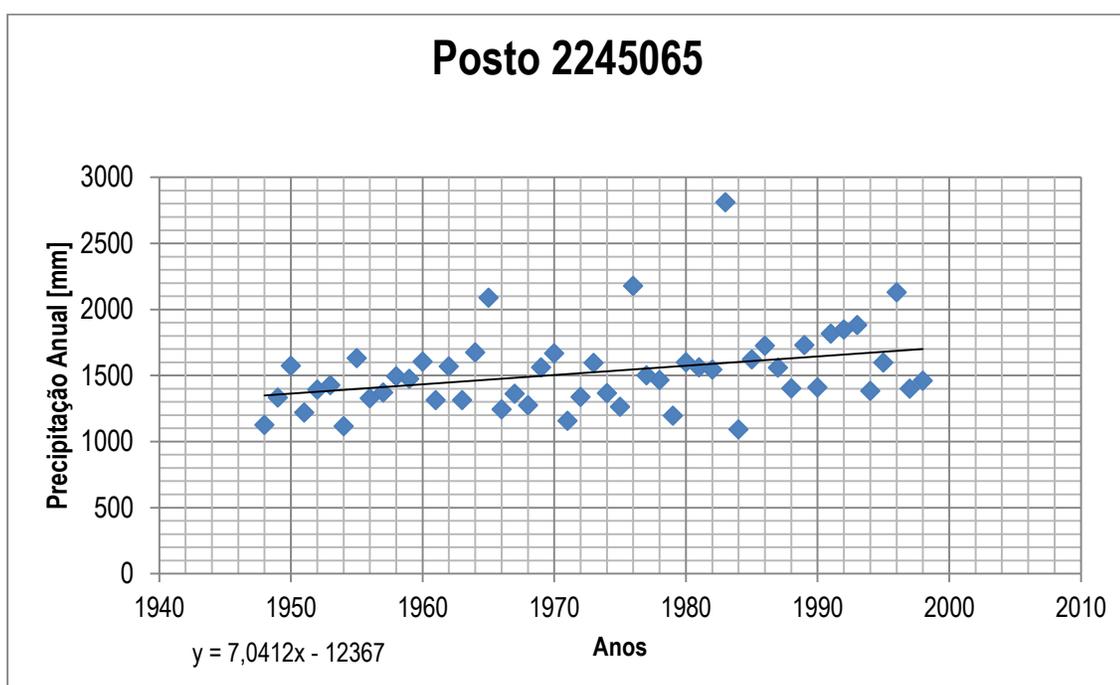


Figura 4.5: Análise de Regressão para o município de Cristina.

Já o teste da flutuação anual permite visualizar o ponto em que a série histórica passa a ter uma alteração do comportamento.

A Figura 4.6 exemplifica o ocorrido, sendo possível observar que, para o município de Baependi, houve um decaimento da precipitação até o início da década de 1970; após esse período, o total precipitado anual foi superior à média anual para o local em estudo.

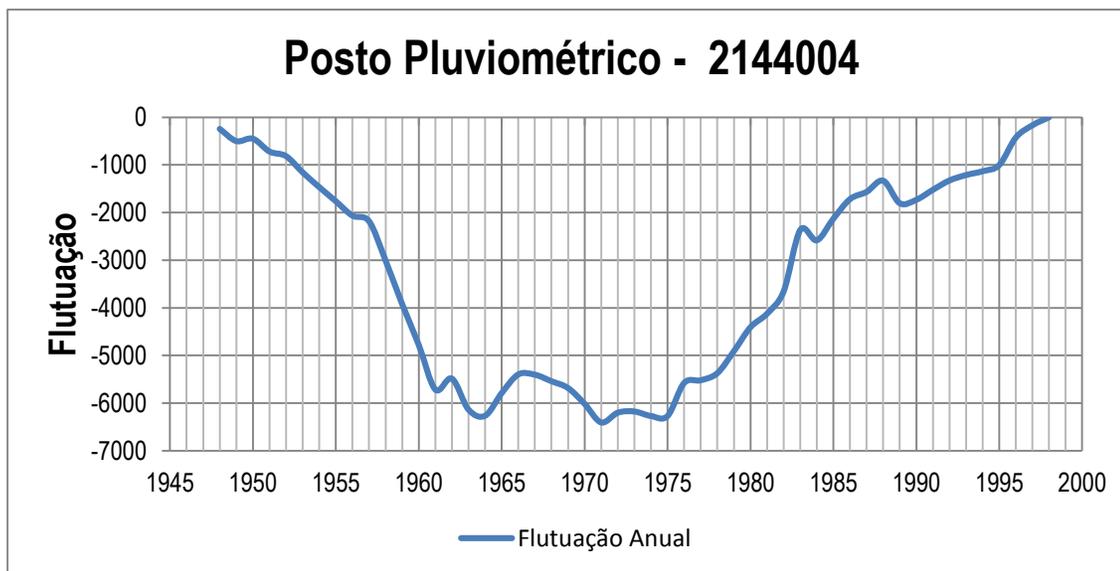


Figura 4.6: Variação acumulada da precipitação para o município de Baependi.

De modo geral, os índices pluviométricos dos postos estudados apresentaram uma tendência de decaimento no período de 1948 até o início da década de 1970, e, a partir deste ponto, os registros dos índices de chuva voltaram a ter uma tendência de aumento.

Os testes da Média Móvel, Flutuação Anual e Regressão Linear permitiram uma melhor visualização gráfica do comportamento das variáveis hidrológicas e serviram para validar os resultados dos testes estatísticos.

A Figura 4.7 representa a disposição dos postos que foram analisados, bem como aqueles que foram identificados como tendo uma tendência de elevação dos dados históricos dos registros de chuva.

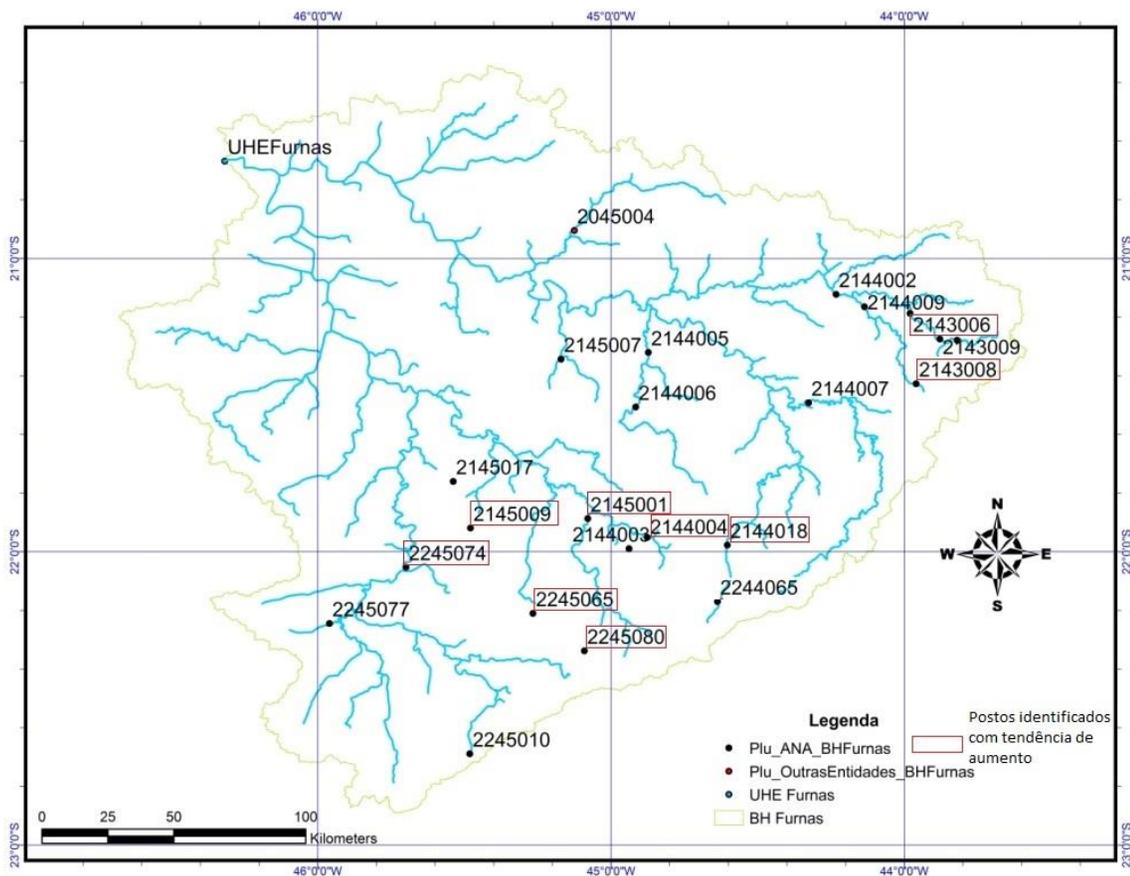


Figura 4.7: Postos pluviométricos selecionados para estudo, identificados como tendo tendência de aumento dos registros de precipitação.

Pela Figura 4.7 pode ser verificado que em 9 dos 22 postos pluviométricos, aproximadamente 40 %, apresentaram tendência significativa de elevação no período entre 1948 e 1998, fato esse que não pode ser desconsiderado, pois é um indicativo de o fenômeno ser de escala regional e deve ser considerado também em outras regiões. Essa avaliação do comportamento das chuvas é muito importante; entretanto, outro fator a ser considerado é a distribuição do evento. Uma diminuição no período de distribuição pode aumentar os picos de cheia e diminuir as mínimas e por consequência, diminuir a disponibilidade hídrica e afetar também outros setores como a agricultura em que a chuva tem um papel climático fundamental para as plantas, pois a água é elemento essencial para o crescimento e desempenha importante papel na fotossíntese e, portanto, na produção.

Em uma análise mais específica para os 22 postos pluviométricos, em que foi identificada a tendência significativa de aumento do volume de chuva para o período de 1948 – 1998, pode ser verificado

que o número de dias de chuva em cada ano não sofreu alteração significativa (Figura 4.8) sendo que o número de dias chuvosos em cada um desses postos atendeu a uma distribuição normal, conforme exemplificado para o posto pluviométrico Usina do Chicão para a cidade de Campanha.

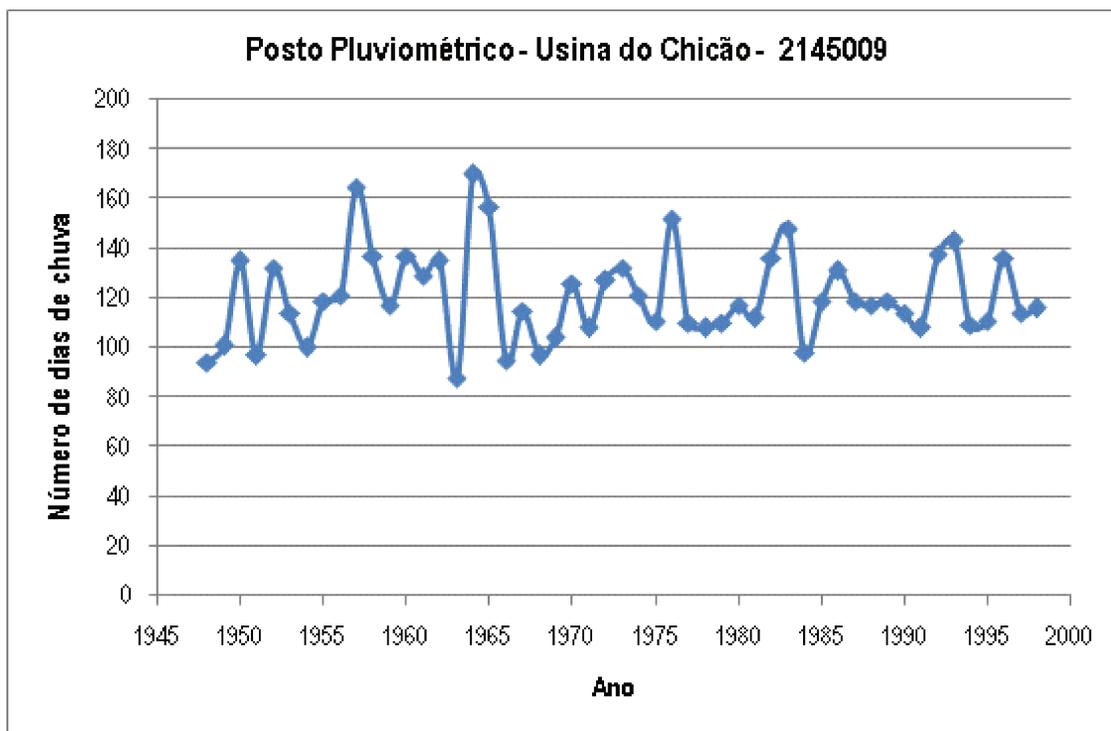


Figura 4.8: Número de dias com chuva no período de 1948 – 1998.

#### 4.1.3 Seleção dos postos pluviométricos

Como a finalidade do estudo é que seja avaliado o impacto nas séries de vazões e avaliar as consequências que essas mudanças podem trazer para a operação da UHE de Furnas e para os usos múltiplos no reservatório, a mesma análise de tendência foi realizada considerando os postos pluviométricos. Na bacia de Furnas (Figura 4.9) foram identificados 46 postos pluviométricos.

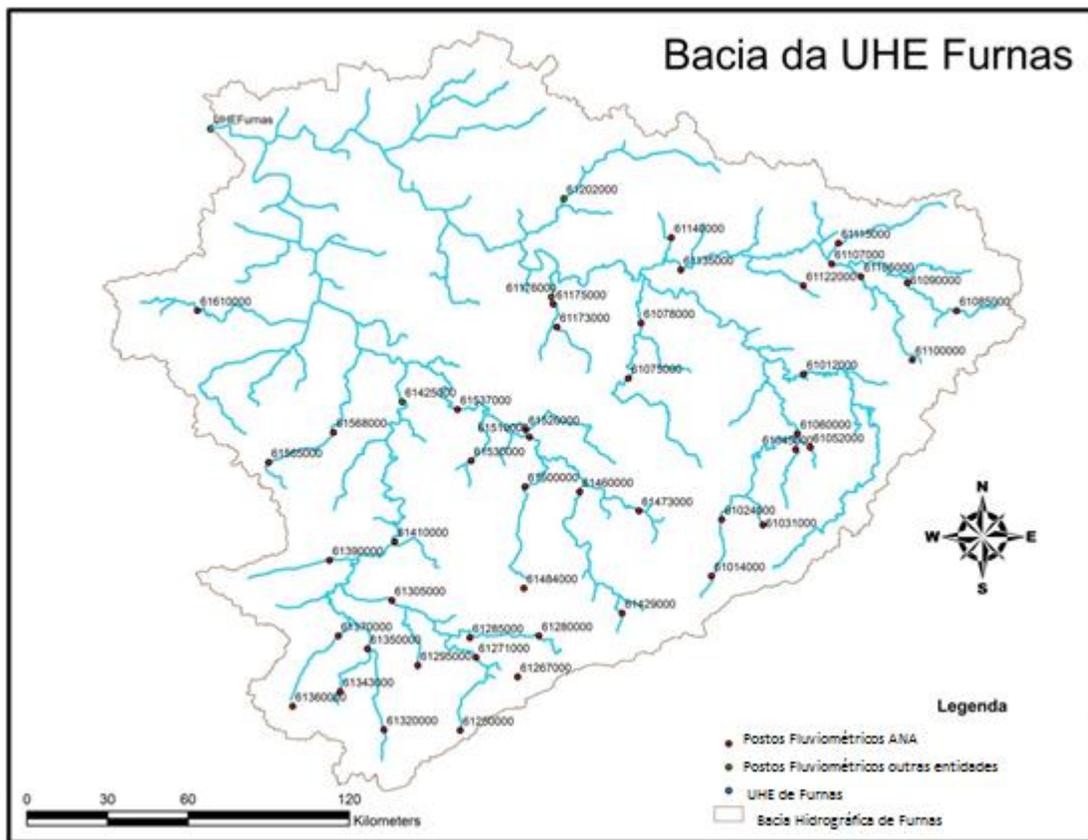


Figura 4.9: Postos fluviométricos da Bacia de Furnas.

Para a seleção das séries fluviométricas, para o estudo de tendência, foram considerados os resultados obtidos para os postos pluviométricos bem como os critérios de disponibilidade de dados, falhas e consistência de dados e localização mais próxima ao exutório. De maneira complementar, foi utilizada a série natural reconstituída pelo ONS para a UHE de Furnas, que utiliza o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia contribuinte, tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial), convergindo para os resultados que estão apresentados na Figura 4.10.

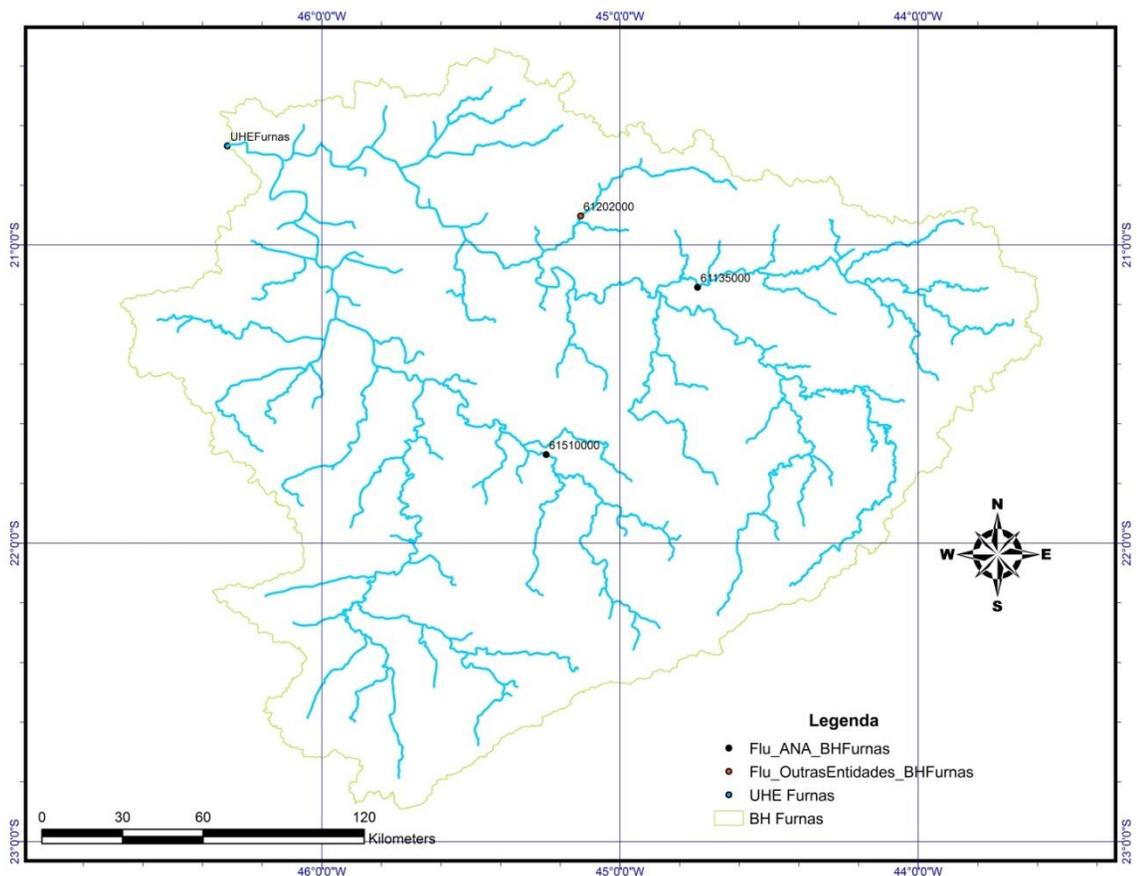


Figura 4.10: Postos fluviométricos selecionados.

As características dos postos selecionados para os estudos estão apresentadas na Tabela 4.6. Vale observar que as informações referentes à vazão média se referem ao período de estudo entre 1948 e 1998.

Tabela 4.6: Características dos postos fluviométricos selecionados.

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Curso d' água</b>	<b>Vazão média (m<sup>3</sup>/s)</b>
Furnas	Furnas	Rio Grande	947
61135000	Ibituruna	Rio das Mortes	119
61202000	Santana do Jacaré	Rio Jacaré	31,7
61510000	Três Corações	Rio Verde	69,8

O posto “Furnas” se refere aos postos disponibilizados pelo ONS e se refere à vazão natural obtida por meio de um processo de reconstituição, que considera a vazão observada no local e as

informações relativas às ações antrópicas na bacia. Os demais postos se referem a séries medidas, as quais são de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA).

#### 4.1.4 Análise das séries temporais de vazão

Após a seleção dos dados, a mesma metodologia utilizada nos postos pluviométricos foi aplicada às séries de vazões Média Anual, para o período de 1948 a 1998 (Tabela 4.7).

Tabela 4.7: Resultados estatísticos para os postos fluviométricos.

<b>Posto</b>	<b>Mann-Kendall</b>	<b>Pettit</b>	<b>Run</b>	<b>Spearman</b>
Furnas	1,10	204	-0,988	0,962
61135000	3,20	388	-2,97	3,60
61202000	-0,60	-220	-3,53	- 0,72
61510000	0,65	232	-1,84	0,76

Com esses resultados, pode ser verificado que o posto 61135000 apresentou tendência significativa de aumento na vazão, fato esse que validou os resultados verificados aos dados precipitação, pelo fato de estar localizada a jusante dos postos que também representaram essa tendência.

Os testes da Média Móvel, Flutuação Anual e Regressão Linear (Figura 4.11) também ilustraram essa tendência.

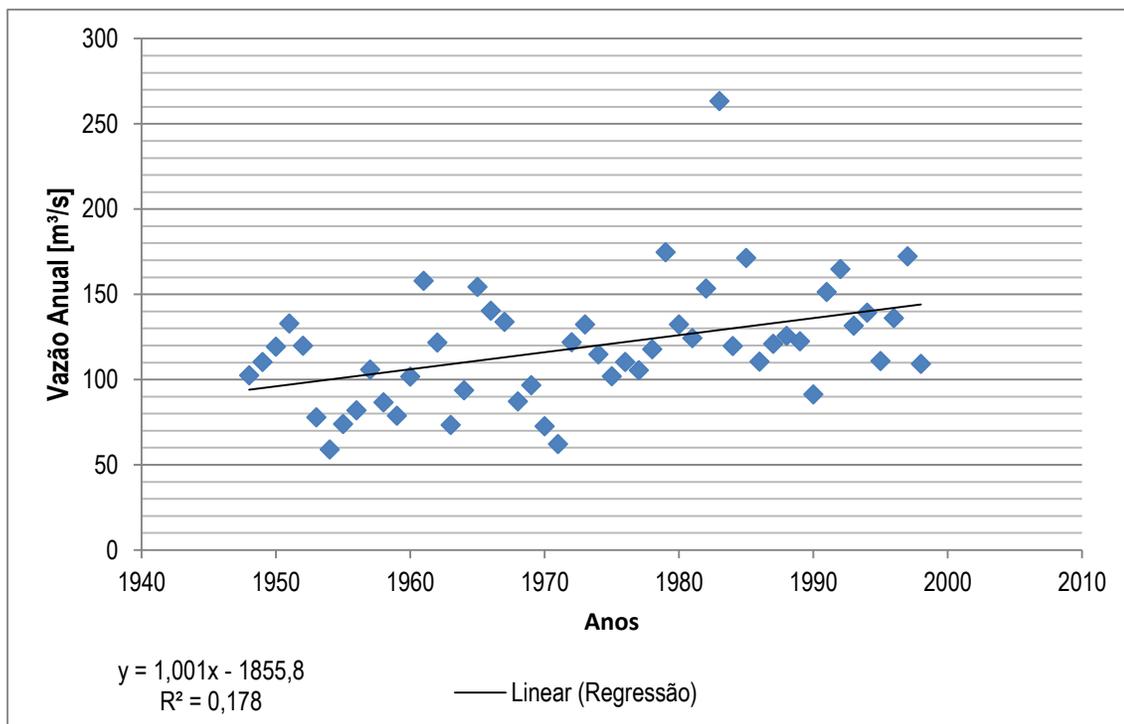


Figura 4.11: Teste de regressão linear para o município de Ibitiruna.

Esse aumento da “oferta hídrica” é um indício de que outras bacias também podem estar sofrendo alterações, fato este que pode se tornar ainda mais relevante diante dos cenários e estudos que evidenciam possíveis mudanças no clima, mas o tema ainda é muito controverso.

Contudo, para a série da usina de Furnas, que está na foz da bacia, os resultados dos testes estatísticos indicam que as vazões apresentam tendência de aumento, mas pouco significativo, o que pode ser verificado pela utilização dos testes de média móvel (Figura 4.12), flutuação anual (Figura 4.13) e regressão linear (Figura 4.14).

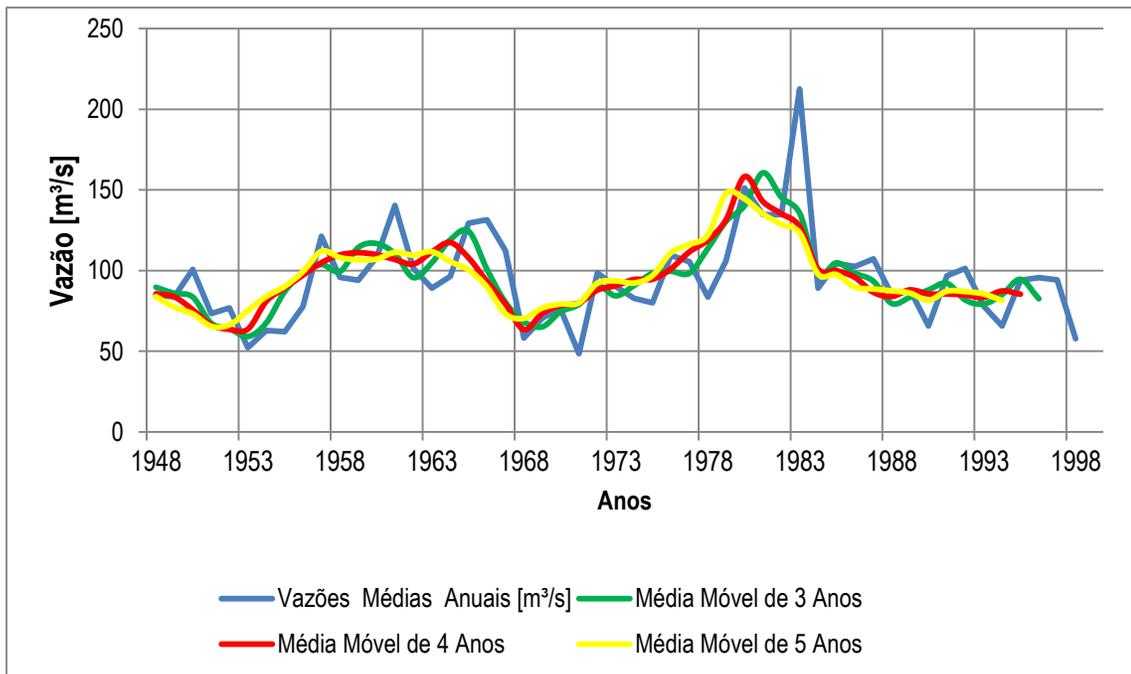


Figura 4.12: Janela Móvel para a série de vazões para a UHE de Furnas.

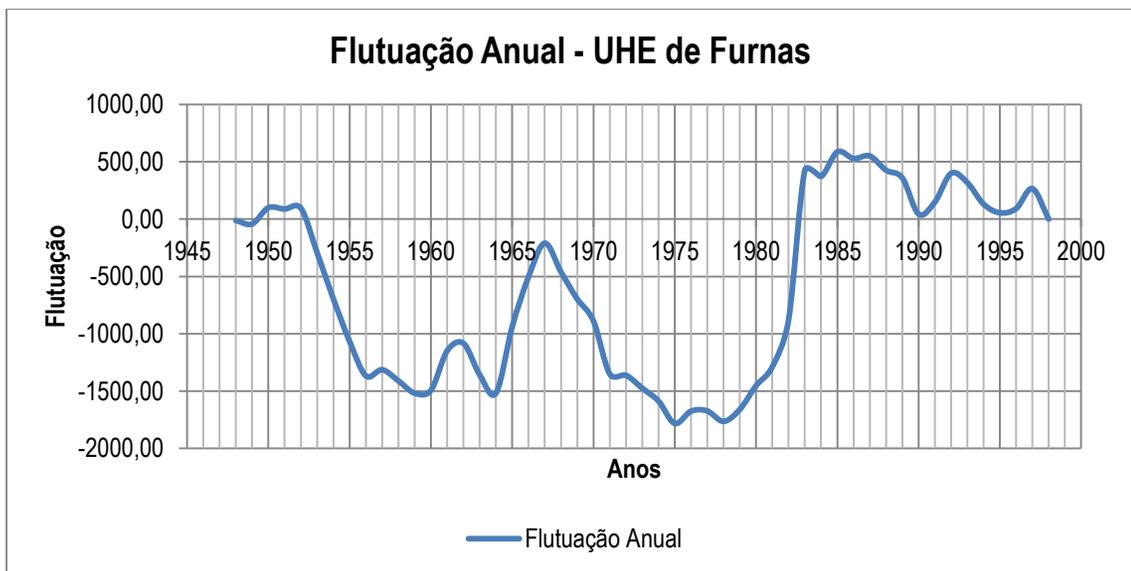


Figura 4.13: Teste de Flutuação aplicado à série de vazões da usina de Furnas.

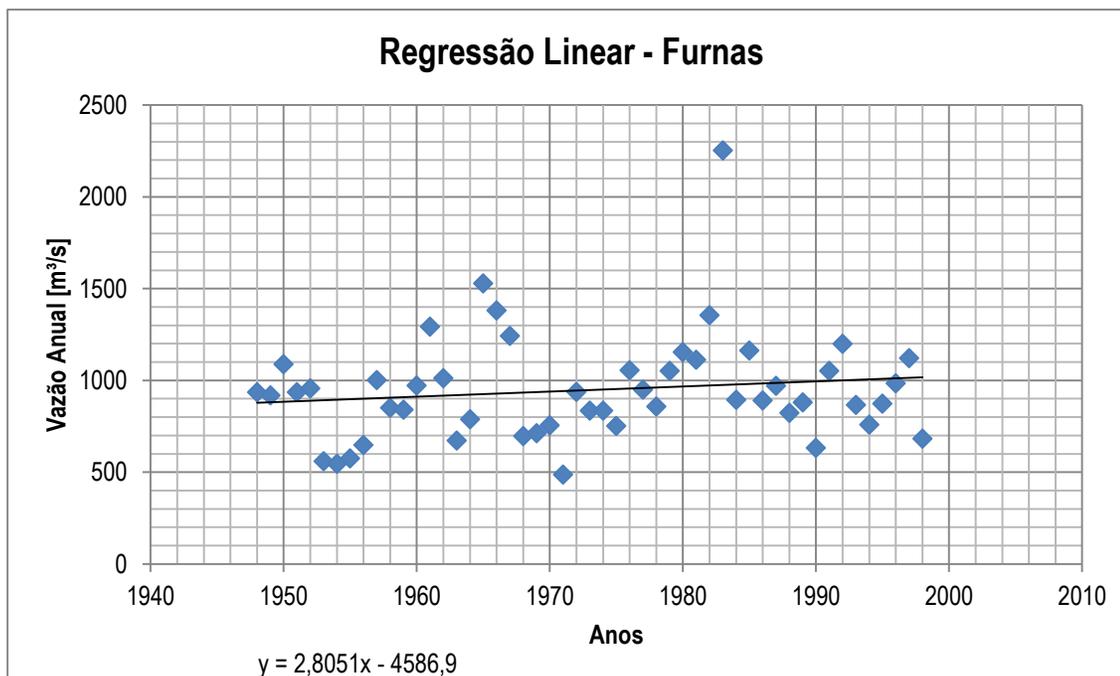


Figura 4.14: Teste de Regressão Linear aplicado à série de vazões da usina de Furnas.

O fato de 40 % dos postos pluviométricos estudados terem indicado aumento significativo nos índices de chuva, a mesma intensidade não foi verificada às séries de vazões em Furnas e pode ser justificada pelos seguintes fatos:

- a metodologia de reconstituição das séries naturais do ONS pode estar sujeita a erros;
- alguns usuários podem retirar água sem solicitar outorga;
- as estações nas quais foram identificadas as tendências possuem área de contribuição pouco significativa e tiveram o efeito amortizado;
- os postos pluviométricos excluídos de análise não apresentam tendência de aumento.

Caso sejam confirmadas as mudanças no comportamento de vazões em outras bacias, o gerenciamento dos recursos hídricos pode ser afetado, e, conseqüentemente, a operação do Sistema Interligado, sob coordenação e planejamento do ONS, que é fortemente dependente da disponibilidade hídrica, e que é baseado em modelos estatísticos e não incorpora possíveis alterações que possam ocorrer no clima de previsões hidrológicas. Mesmo o sistema sendo interligado, o que reduz o risco de falha do sistema como um todo, grande parte do conjunto de usinas hidrelétricas está localizado na região Sudeste,

o que concentra o risco de falha do ponto de vista espacial, porque as diversas usinas estão sujeitas às mesmas variabilidades climáticas.

## 4.2 Ajuste do Modelo MGB para a bacia de Furnas

### 4.2.1 Calibração do modelo

Como parte do processo de modelagem, foram gerados mapas de relevo de alta e baixa resolução, respectivamente, para a bacia hidrográfica em estudo.

As cores refletem a elevação do terreno, na ordem: azul escuro, verde, amarelo, laranja, vermelho e roxo, das cotas menores para as maiores (Figura 4.15).

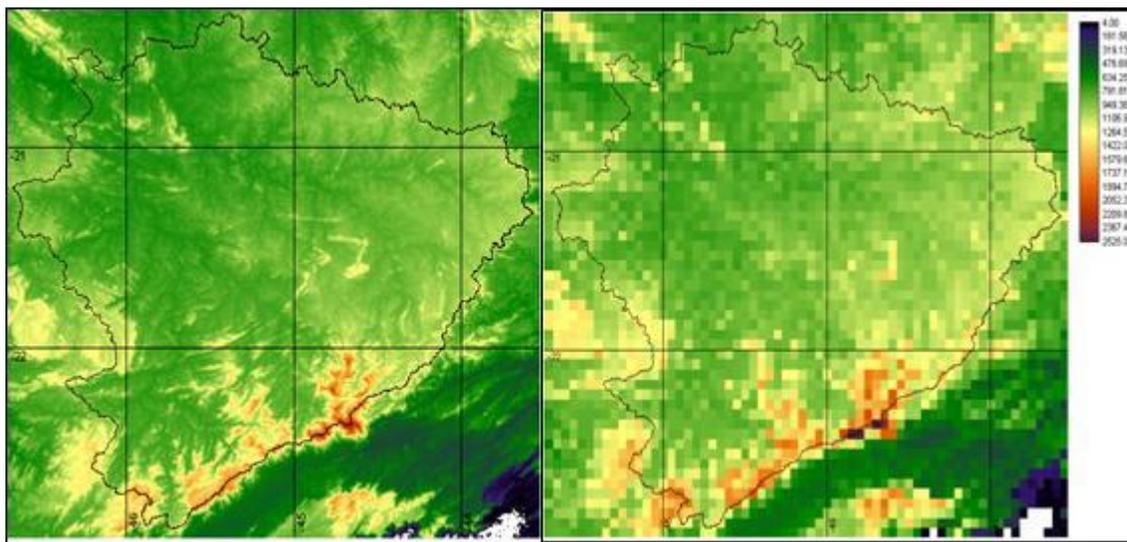


Figura 4.15: Imagens de alta e baixa resolução da topografia da bacia hidrográfica de Furnas, com seu traçado.

Desse modo, pode ser verificado que grande parte da bacia está caracterizada pela tonalidade verde, que se concentra entre as altitudes de 700 a 900 metros.

Para definição das sub-bacias, que auxiliaram na calibração do modelo, foram selecionados postos fluviométricos (Tabela 4.8), considerando a abrangência, consistência dos dados disponíveis, e que contemplasse o período de validação dos modelos climáticos do IPCC.

Sendo assim, os dados de vazão utilizados nesta fase foram de janeiro de 1968 até dezembro de 1990. Para não haver interferências e tendências no ajuste e verificação do modelo, os dados com falhas não foram utilizados.

Tabela 4.8: Postos fluviométricos utilizados.

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Rio</b>	<b>Área de drenagem (km<sup>2</sup>)</b>
61012000	Madre de Deus de Minas	Rio Grande	2070
61060000	Fazenda Laranjeiras	Rio Grande	1960
61075000	Luminarias	Rio Ingaí	1010
61078000	Itumirim	Rio Capivari	1820
61107000	Porto Tiradentes	Rio Das Mortes	2720
61135000	Ibituruna	Rio Das Mortes	6070
61145000	Macaia	Rio Grande	15400
61272000	Itajubá	Rio Sapucaí	870
61285000	São João de Itajubá	Rio Lourenço Velho	560
61305000	Santa Rita do Sapucaí	Rio Sapucaí	2810
61350000	Conceição dos Ouros	Rio Sapucaí-Mirim	1310
61370000	Ponte do Rodrigues	Rio Itaim	676
61410000	Careaçu	Rio Sapucaí	7330
61425000	Paraguaçu-Montante	Rio Sapucaí	9424
61460000	Conceição do Rio Verde	Rio Verde	1840
61473000	Baependi	Rio Baependi	614
61500000	Fazenda Juca Casimiro	Rio Lambari	744
61510000	Três Corações	Rio Verde	4180
61537000	Porto dos Buenos	Rio Verde	6300
61661000	UHE Furnas Barramento	Passos	50464

Para facilitar o estudo e os processos futuros, foi definido que o conjunto de algumas dessas sub-bacias, que não necessariamente podem coincidir com uma área de drenagem real da bacia, sirvam como ponto de controle, já que cada sub-bacia tem como exutório um posto fluviométrico com dados observados

além das séries de vazões naturais da UHE de Furnas, obtidas no ONS. Dessa forma, foram delimitadas 20 sub-bacias, que foram utilizadas na calibração e utilização do modelo (Figura 4.16), os quais receberam o mesmo nome de seu posto fluviométrico exutório.

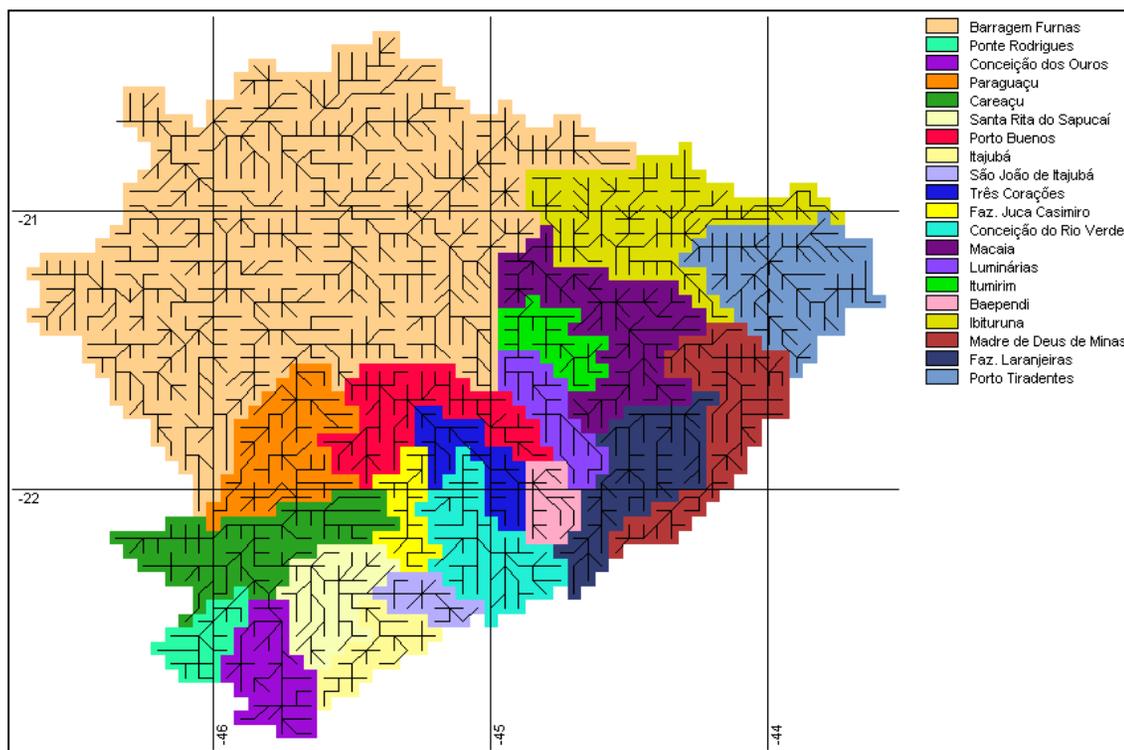


Figura 4.16: Sub-bacias definidas para a calibração do modelo.

Após a elaboração dos mapas das sub-bacias, foi executado o processo para elaborar um arquivo de chuvas diárias para todas as células da imagem de baixa resolução em todo o intervalo de tempo estudado. O resultado dessa interpolação é utilizado pelo modelo para cálculos de balanço hídrico.

Para estimativa do balanço hídrico, o modelo necessita de informações climáticas da região, entre elas temperatura, umidade, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação na superfície, sendo selecionadas quatro estações climatológicas do INMET, descritas na Tabela 4.9, cujos dados utilizados apresentam-se no Anexo C.

Tabela 4.9: Estações climatológicas dentro da bacia a montante da barragem de Furnas.

Nome da Estação	Código	Localização (Long. x Lat.)
Campos do Jordão	32527	-45.57° x -22.72 °
Itajubá	32512	-45.44° x -22.41 °
Lavras	32511	-44.97° x -22.22 °
Machado	32526	-45.89° x -21.70 °

A união dos mapas de cotas, direções de fluxo, etc., em apenas um arquivo, é necessária para a utilização do modelo. Esse processo realiza-se por meio de uma rotina, que organiza de forma automática os dados por células de baixa resolução georreferenciadas.

Por fim, são realizados ajustes manuais dos parâmetros para as sub-bacias. Após essa etapa, o modelo parte para uma calibração automática, no sentido das bacias a montante para jusante, comparando os valores observados nos postos fluviométricos e realizando os cálculos de NS, NSlog e  $\Delta V$ .

#### 4.2.2 Resultados do modelo

O modelo hidrológico MGB-IPH foi ajustado e calibrado para a bacia do Rio Grande até a barragem da UHE de Furnas. A bacia foi dividida em 1806 células regulares, com resolução de aproximadamente 5 km.

O MGB foi calibrado com os dados observados entre o período de 1968 a 1980, enquanto o período de 1981 a 1990 foi selecionado para a validação da calibração e verificação do ajuste.

A escolha do período de calibração e verificação foi arbitrária, ou seja, não existe uma metodologia específica de escolha desses períodos. O que se recomenda é selecionar um período de pelo menos 10 anos para a calibração e verificação, pois a escolha de um período menor pode ocorrer erros na simulação do modelo.

O início da calibração se deu em 1968, devido a maior consistência, e o período de 1981-1990 foi escolhido para a calibração para poder coincidir com os dados do modelo Eta.

Os dados de vazões observadas para a calibração foram retirados dos postos. Para efeito de simplificações, os dados das PCHs foram ignorados, já que eles influenciam pouco no hidrograma, e as usinas possuem pequenos reservatórios, que operam a fio d'água. Na Tabela 4.10 serão apresentados os parâmetros para verificação da qualidade da calibração para as 20 sub- bacias de estudo.

Tabela 4.10: Parâmetros para ajuste do MGB.

<b>Sub-bacias</b>	<b>NS</b>	<b>NS log</b>	<b><math>\Delta V</math></b>
<b>Conceição dos Ouros</b>	0.625	0.649	20.699
<b>Ponte Rodrigues</b>	0.652	0.565	10.725
<b>Itajubá</b>	0.008	0.278	12.676
<b>São João de Itajubá</b>	0.224	0.487	29.906
<b>Santa Rita do Sapucaí</b>	0.834	0.760	13.997
<b>Careaçu</b>	0.870	0.817	6.082
<b>Paraguaçu</b>	0.068	0.384	25.527
<b>Conceição do rio Verde</b>	0.571	0.669	30.992
<b>Faz. Juca Casimiro</b>	0.638	0.624	15.099
<b>Baependi</b>	0.718	0.773	-1.951
<b>Três Corações</b>	0.825	0.830	14.991
<b>Porto Buenos</b>	0.655	0.754	26.286
<b>Faz.Laranjeiras</b>	0.545	0.705	24.519
<b>Madre de Deus de Minas</b>	0.689	0.735	16.008
<b>Luminárias</b>	0.799	0.770	18.672
<b>Itumirim</b>	0.563	0.540	19.952
<b>Porto Tiradentes</b>	0.462	0.660	17.323
<b>Ibituruna</b>	0.670	0.765	16.589
<b>Macáia</b>	0.496	0.625	24.389
<b>Furnas</b>	0.713	0.834	12.470

Conforme pode ser observado, o valor de NS log próximo de 0,83 para a sub-bacia de Furnas mostra que o MGB foi bem ajustado para a bacia de estudo.

Na Figura 4.17, apresenta-se uma comparação entre a calibração e a verificação na “sub-bacia de Furnas”. Nota-se que nesse caso, o modelo representa muito bem o comportamento hidrológico. A representação da calibração em (a) ficou ligeiramente melhor, se for comparada com a verificação (b),

especialmente para as vazões mínimas. Acredita-se que esse erro se deva a uma provável intensificação do uso consuntivo de água, no período de verificação ou de um possível aumento da evaporação do lago de Furnas.

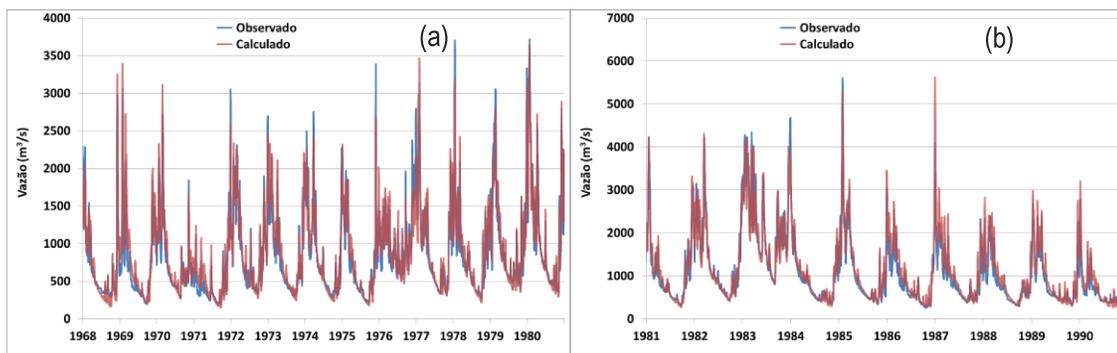


Figura 4.17: Hidrogramas calculados e observados para bacia de Furnas. Comparação dos dados para o período de calibração (a) e comparação dos dados do período de validação (b)

Para efeito didático, na Tabela 4.11, são apresentados os dados comparativos de vazão observados e calculados pelo MGB.

Tabela 4.11: Permanência de vazões (m<sup>3</sup>/s).

Permanência	Furnas - MGB	Furnas - Obs	Diferença (%)
0%	6604,6	5606,0	18%
5%	2564,5	2578,4	-1%
10%	2072,9	2005,8	3%
15%	1763,0	1670,0	6%
20%	1541,3	1453,0	6%
25%	1363,9	1251,0	9%
30%	1206,8	1104,0	9%
35%	1091,1	985,0	11%
40%	990,3	892,0	11%
45%	897,6	806,0	11%
50%	812,8	726,0	12%
55%	728,1	670,0	9%
60%	657,9	618,0	6%
65%	595,5	571,0	4%
70%	538,4	526,0	2%

Permanência	Furnas - MGB	Furnas - Obs	Diferença (%)
75%	487,2	485,0	0%
80%	444,1	450,0	- 1%
85%	399,7	413,0	- 3%
90%	352,2	374,0	- 6%
95%	295,0	326,0	- 10%
100%	148,3	196,0	- 24%

Analisando esses dados, pode ser verificado que o MGB conseguiu representar de maneira satisfatória os dados de vazão, se comparado aos dados de vazão observados, pois o erro relativo é de aproximadamente 4 %, sendo que este efeito se repete tanto para as vazões máximas, como para as mínimas.

### 4.3 Aplicação dos cenários climáticos do modelo Eta

Após ajuste e calibração do MGB, foram realizadas projeções de vazões para o período de janeiro de 2011 até o final de novembro de 2099. Para alimentar o modelo chuva vazão, foram utilizadas as seis variáveis climatológicas projetadas pelo modelo Eta dentro dos parâmetros do cenário A1B do IPCC.

A partir da definição do cenário de emissão de gases estufa, foram feitas perturbações em alguns parâmetros do modelo, tendo como resultado a geração de centenas de membros, dentre os quais foram escolhidos apenas três, que apresentaram uma alta, média e baixa (*Hight, Medium, Low*) sensibilidade na resposta da temperatura média global futura, bem como a utilização de um membro sem nenhuma perturbação caracterizado como Controle.

As projeções foram divididas em intervalos que vão de 1/1/2011 até 30/12/2040, 1/1/2041 até 30/12/2070 e 1/1/2071 até 30/11/2099, sendo que o calendário possui 30 dias mensais, de modo que cada ano tem 360 dias.

Na Figura 4.18, representa-se a vazão média mensal, exutório da bacia para os quatro cenários do modelo Eta e para as vazões observadas no período de 1961 a 1990.

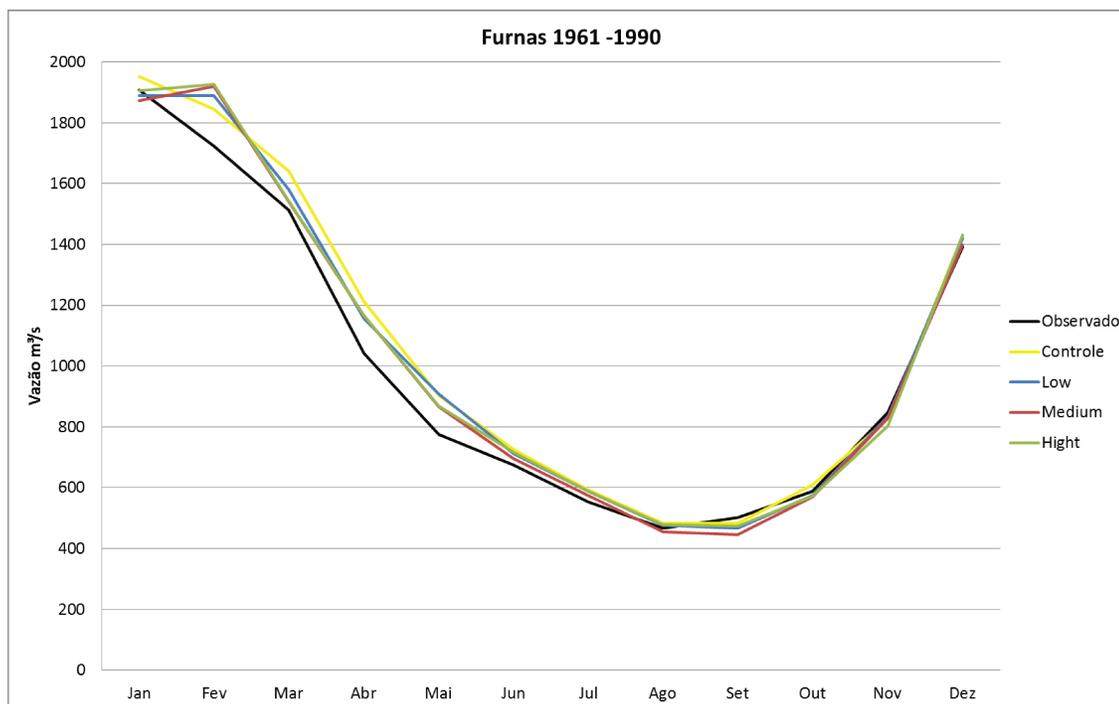


Figura 4.18: Vazões observadas e dos quatro cenários do modelo Eta para o período entre 1961 e 1990.

No gráfico apresentado pela Figura 4.18, pode ser verificado que o modelo Eta está bem ajustado para o período de maio a dezembro. Todos os cenários em relação aos dados observados, analisando Nos demais meses, pode ser verificado que as projeções do modelo climático estão bem ajustadas entre si; contudo, sofrem desvio relativo pequeno em relação aos dados observados, os quais são justificados pela dificuldade na representação dos picos dos eventos de cheia dos dados observados.

As projeções das vazões médias mensais para os quatro cenários do modelo Eta para o período de 2011 a 2040 estão representadas na Figura 4.19.

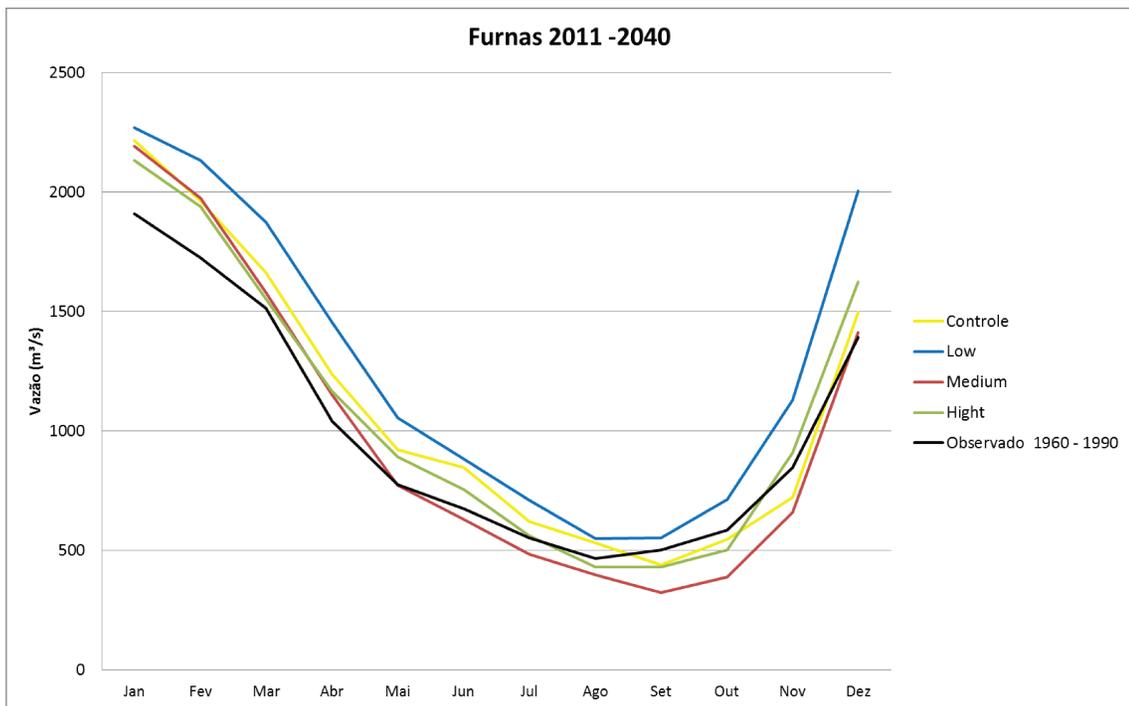


Figura 4.19: Projeções de vazões para o período de 2011 – 2040.

No período de janeiro a abril, a curva “Low” está mais deslocada das demais, sendo mais otimista em relação à disponibilidade hídrica. Para o mesmo período, as demais curvas apresentam boa aproximação, sendo que todos os cenários apontam para maiores valores de vazão, se comparados aos dados observados. Os cenários “Controle”, “High” e “Medium” preveem maiores estiagens, se comparados aos dados observados, sendo que este último é o mais restritivo.

Para o período de 2041 a 2070, na Figura 4.20, representam-se projeções para as vazões médias mensais para os quatro cenários do modelo Eta.

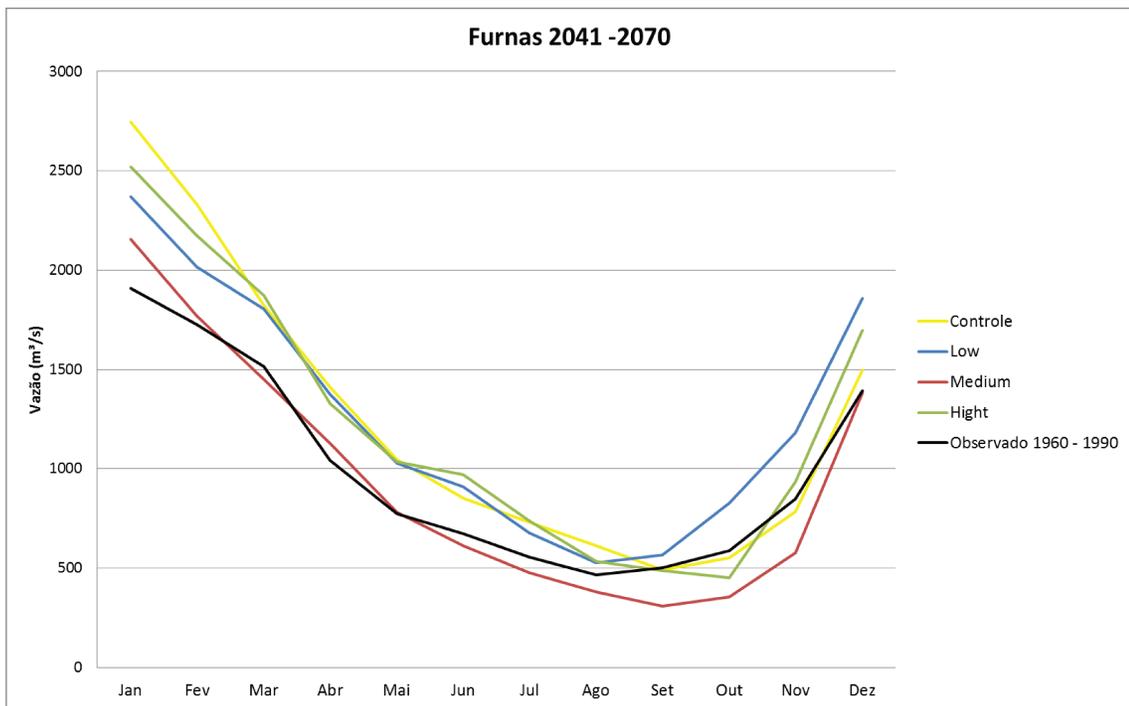


Figura 4.20: Projeções de vazões para o período de 2041 – 2070.

Os resultados mostram que para o primeiro bimestre de 2041 a 2070, todos os cenários convergem para maiores valores de vazão em relação aos dados observados. As projeções do cenário “low” indicam maiores valores de vazões para o período de Setembro a Dezembro. A curva “medium” estima maior estiagem entre os meses de maio a dezembro. De modo geral, pode ser verificado que para esse triênio, os cenários estimam maior oferta hídrica.

Por fim, na Figura 4.21, representam-se os cenários de vazão para o período de 2071 a 2099.

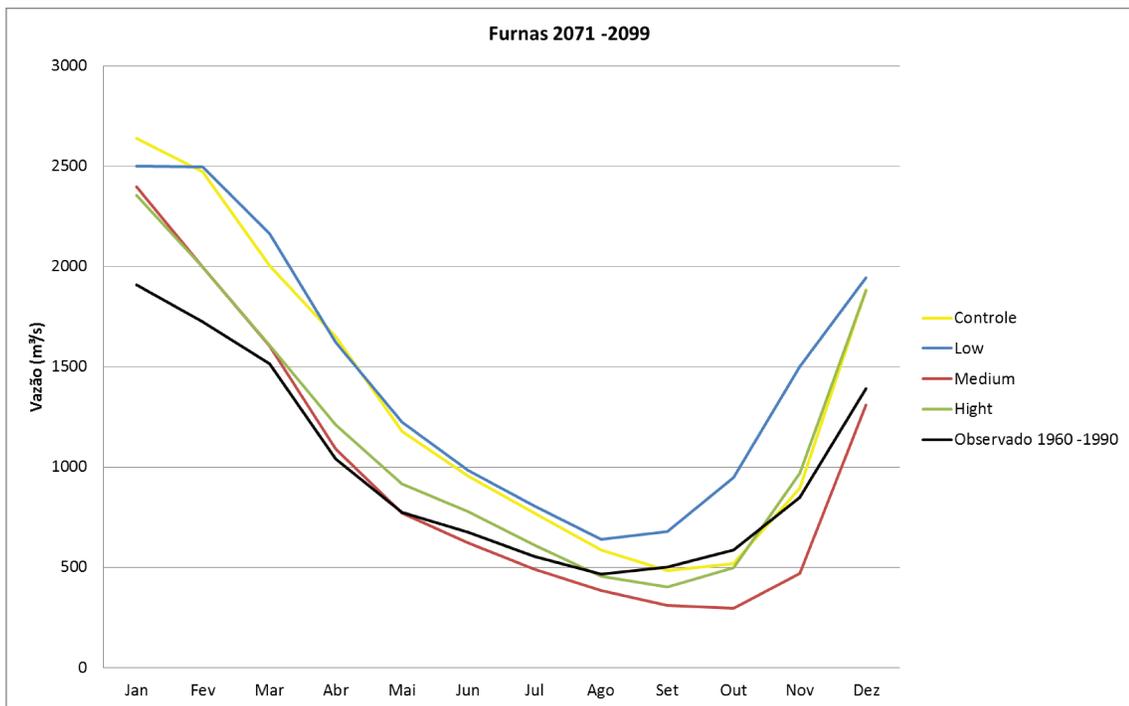


Figura 4.21: Projeções de vazões para o período de 2071 – 2099.

Do mesmo modo que o triênio 2041 - 2070, o período de 2071 a 2099 é mais otimista em relação às projeções de vazões. Entre os meses de Janeiro a Agosto, os cenários “Controle” e “Low” são próximos, sendo que entre os meses de Outubro a Dezembro, os cenários “Controle” e “High” apresentam comportamento semelhante.

Na Figura 4.22, representam-se os hidrogramas médios mensais para os quatro cenários A1B do modelo Eta para o período de 2011 a 2099.

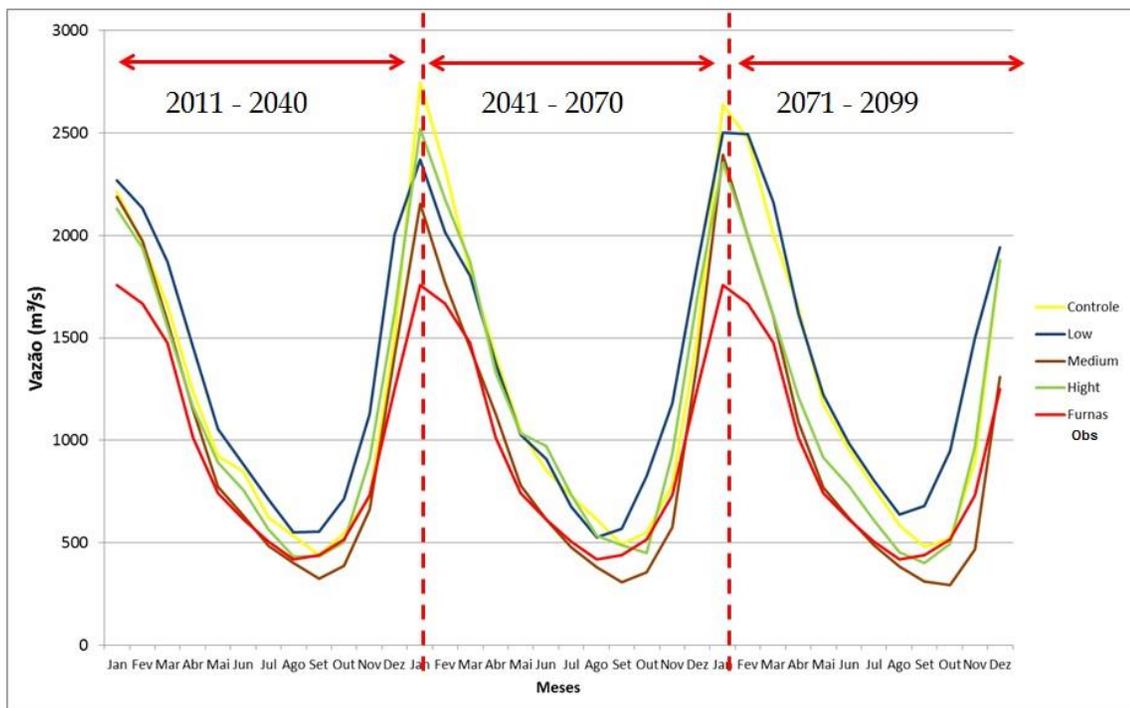


Figura 4.22: Projeções de vazão utilizando o MGB, alimentado pelo modelo Eta, considerando os parâmetros do cenário A1B do IPCC.

Conforme pode ser verificado, o cenário *médium* é o mais conservador no que se refere às vazões afluentes projetadas para Furnas. Sendo assim, caso esse cenário se confirme, será necessária maior utilização do reservatório de acumulação, de modo que o lago tende a esvaziar em maior magnitude e duração, acarretando maiores conflitos pelo uso da água.

#### 4.4 Aplicação do modelo de operação proposto

##### 4.4.1 Projeção de níveis do reservatório de Furnas

Após o ajuste e calibração do MGB, resultando nas projeções de vazões para o período de janeiro de 2012 a novembro de 2099 para a UHE de Furnas, o cenário "*medium*" apresentou ser o mais conservador, dentre os que foram projetados pelo modelo Eta, com base no cenário A1B do IPCC, razão

pela qual será utilizado como referência para as vazões afluentes (entrada), nas simulações de operação de reservatórios, possibilitando maiores conflitos pelo uso da água no entorno do reservatório.

Para estimativa/projeções dos níveis do reservatório, são consideradas as seguintes premissas apresentadas no Capítulo 3:

- a. a usina repete o histórico médio de geração entre 1963 e 2011;
- b. por meio de um CBH bem estruturado, a UHE de Furnas irá trabalhar de modo a ponderar os interesses dos usuários de montante e jusante, conforme metodologia apresentada por Ribeiro Junior (2004).

Contudo, para o desenvolvimento das simulações, foram respeitadas as seguintes características da UHE de Furnas:

Nível máximo de armazenamento: 768 m;

Nível mínimo de operação: 750 m;

Volume útil: 17,217 bilhões m<sup>3</sup>;

Volume morto: 5,73 bilhões m<sup>3</sup>.

Curva cota-volume:

$$h_{med} = 735,245 + 0,0035 * V_m - 1,97E^{-7} * V_m^2 + 6,92E^{-12} * V_m^3 - 9,77E^{-17} * V_m^4$$

Curva produtividade-volume: Produtividade = 16,98 - 0,051\* h<sub>med</sub>+ 3,94 E-05\* h<sub>med</sub><sup>2</sup>;

Energia (GWh) = Produtividade \* Vazão defluente;

Sendo: h<sub>med</sub>= Altura média no reservatório em metros;

V<sub>m</sub> = Volume médio do reservatório em bilhões m<sup>3</sup>.

Conforme as características da usina e considerando a afluência de vazões projetada pelo modelo Eta, o objetivo foi verificar o nível do reservatório, caso Furnas viesse a manter o histórico médio de geração, aqui denominada de “Simulação 1”, por meio da rotina, exemplificada para o mês de janeiro de 2014, na qual existe a seguinte condição:

Nível do reservatório no mês anterior: 768 m (cota máxima);

Vazão afluyente projetada: 1447,9 m<sup>3</sup>/s;

Energia desejada: 371,7 GWh.

Para atender esta demanda energética, calcula-se a vazão defluente, que no caso é de 458,9 m<sup>3</sup>/s. Contudo, a vazão afluyente é superior à defluente, ou seja, é possível obter maior geração de energia sem esvaziar o reservatório. Desse modo, para otimização dos recursos naturais disponíveis, pode ser verificado que é possível atingir a capacidade máxima de geração, com uma vazão defluente de 1095,9 m<sup>3</sup>/s.

Porém, em alguns meses, para atender à demanda energética, faz-se necessária a redução do volume do reservatório, conforme exemplo abaixo:

Para o mês de julho de 2014, tem-se a seguinte condição:

Nível do reservatório no mês anterior: 768 m (cota máxima);

Vazão afluyente projetada: 454,1 m<sup>3</sup>/s;

Energia desejada: 457,3 GWh;

Vazão defluente para atendimento a esta demanda, 564,5 m<sup>3</sup>/s.

Como a vazão defluente é superior à afluyente, o volume útil do reservatório foi reduzido para 98,3 % de sua capacidade, equivalente à cota 767,8 m.

O resultado das projeções e um comparativo com o histórico da operação da usina estão representados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Projeção de permanência do nível do reservatório de Furnas, considerando a manutenção da geração média histórica.

Percentil	2012– 2040	2041 - 2070	2071- 2099	Histórico de Furnas
0%	768,0	768,0	768,0	768,0
5%	768,0	768,0	768,0	767,8
10%	768,0	768,0	768,0	767,7
15%	768,0	768,0	768,0	767,5
20%	768,0	768,0	768,0	767,2
25%	768,0	768,0	768,0	766,8
30%	768,0	768,0	768,0	766,5
35%	768,0	768,0	768,0	766,2
40%	768,0	768,0	768,0	765,9
45%	768,0	768,0	768,0	765,6
50%	768,0	767,8	767,9	765,1
55%	767,9	767,6	767,7	764,6
60%	767,7	767,3	767,5	764,1
65%	767,6	767,0	767,2	763,5
70%	767,2	766,7	766,8	762,8
75%	767,0	766,4	766,5	762,1
80%	766,8	765,8	766,0	761,2
85%	766,5	765,0	765,6	759,9
90%	766,0	763,8	764,9	758,4
95%	765,6	761,1	763,9	755,7
100%	763,5	750,0	758,7	751,5

Deste modo, pode ser verificado que, caso os cenários do modelo Eta se confirmem, bem como a UHE de Furnas continue a atender a mesma demanda média mensal de energia, o reservatório tende a permanecer mais cheio, quando comparado ao histórico de operação. Isso se deve principalmente pelo fato do modelo climático projetar maior oferta hídrica no período úmido, conforme apresentado no Item 4.3. Entretanto, pode ser observado que, para o triênio 2041 – 2070, devido a um período de estiagem prolongado, o reservatório poderá esvaziar-se por completo para que seja atendida a demanda de energia, o que deve ser evitado, pois certamente prejudicará as demais atividades que dependem do recurso hídrico disponível no lago. Contudo, para a população de jusante, interessada em uma vazão de descarga mais regular possível, esse efeito não é garantido (Figura 4.23).



Figura 4.23: Projeção da defluência de Furnas para o período 2012 – 2100, considerando como dado de entrada as vazões estimadas por meio dos parâmetros do cenário A1B do IPCC.

Do ponto de vista energético, pelo fato de a disponibilidade hídrica ser maior e analisando somente a UHE de Furnas, sem considerar o efeito sobre o SIN (que não foi foco deste trabalho), bem como as possíveis restrições do setor, pode ser verificado que a UHE terá maior geração de energia, esvaziando o reservatório em menor magnitude (Tabela 4.13).

Tabela 4.13: Projeção de geração de energia de Furnas.

	2012 - 2040	2041– 2070	2071- 2099	Histórico de Furnas
Energia em (GWh)	579,4	554,8	544,8	424,3
Geração em (%)	65,3	62,5	61,4	47,8

Casos as projeções do modelo A1B se verificarem, a UHE de Furnas pode ter um incremento na geração em 32% e mantendo o reservatório mais cheio. Contudo, a população de jusante terá que conviver com a variação da vazão afluente.

Na hipótese de a demanda por energia aumentar e a disponibilidade do parque de geração não acompanhar este crescimento, Furnas pode ter maior participação no SIN. Considerando essa

possibilidade, foi realizado um novo estudo, “Simulação2”, ponderando que a UHE venha atender à demanda média mensal (histórica), todos os meses, acrescida do desvio padrão da amostra (Tabela 4.14).

Tabela 4.14: Geração média + desvio padrão (GWh).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Media
503,0	485,6	545,2	515,6	525,2	527,8	558,5	615,7	610,1	601,3	531,4	500,7	543,3

Nesse caso, pode ser verificado que a geração de energia teve um acréscimo médio mensal de aproximadamente 28%. Sendo assim, para atender a esta demanda, o reservatório passaria a operar conforme a Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Projeção da permanência do nível do reservatório de Furnas, Simulação 2.

Percentil	2012 - 2040	2041 - 2070	2071- 2099	Histórico de Furnas
0%	768,0	768,0	768,0	768,0
5%	768,0	768,0	768,0	767,8
10%	768,0	768,0	768,0	767,7
15%	768,0	768,0	768,0	767,5
20%	768,0	768,0	768,0	767,2
25%	768,0	768,0	768,0	766,8
30%	768,0	768,0	767,8	766,5
35%	768,0	767,9	767,5	766,2
40%	767,8	767,6	767,1	765,9
45%	767,6	767,3	766,8	765,6
50%	767,4	766,7	766,3	765,1
55%	767,1	766,1	765,6	764,6
60%	766,8	765,5	765,1	764,1
65%	766,4	764,7	764,2	763,5
70%	766,1	763,6	763,4	762,8
75%	765,7	760,9	762,6	762,1
80%	765,3	756,7	761,4	761,2
85%	764,7	752,6	759,8	759,9
90%	764,1	750,0	757,5	758,4
95%	763,3	750,0	752,7	755,7
100%	759,0	750,0	750,0	751,5

Caso essa projeção se verifique para o triênio 2041 – 2070, o reservatório pode permanecer aproximadamente 10 % do tempo na cota mínima, sendo que esse intervalo de tempo não foi registrado no histórico, podendo acirrar conflitos pelo uso da água.

Para os demais triênios, também pode ser observada uma grande alteração. Na Tabela 4.12, para o triênio 2071 – 2099, a cota mínima registrada foi a 758,7 m. Nesse cenário, o reservatório ficaria mais de 15% do tempo abaixo deste nível. Já a produção média de energia, foi projetada em 603,7GWh, aproximadamente 68 % da capacidade da usina, representando acréscimo de 11 % em relação ao valor planejado de 543,3 GWh.

Todavia, deve ser considerado que o grande período contínuo que o reservatório permanece abaixo do nível desejado (762 m), que nesse caso se refere ao intervalo de Agosto de 2043 a Janeiro de 2046 e de Abril de 2059 a Janeiro de 2064, é um dos fatores que pode trazer danos em grandes proporções e até mesmo irreversíveis para as atividades que se desenvolvem no entorno do lago.

Por fim, uma nova análise foi realizada, “Simulação 3”, considerando a necessidade de ponderação dos interesses dos usuários, que além da manutenção do nível do reservatório devem contemplar a regularização de vazão para atendimento às necessidades da população de jusante. Sendo assim, foram utilizadas as séries de vazão defluente (Figura 4.24)  $W_1 = 1E-5$ , determinadas pelo “*trade-off*”, que foi um instrumento de negociação, utilizado para ponderação dos interesses, conforme metodologia desenvolvida por Ribeiro Junior (2004).

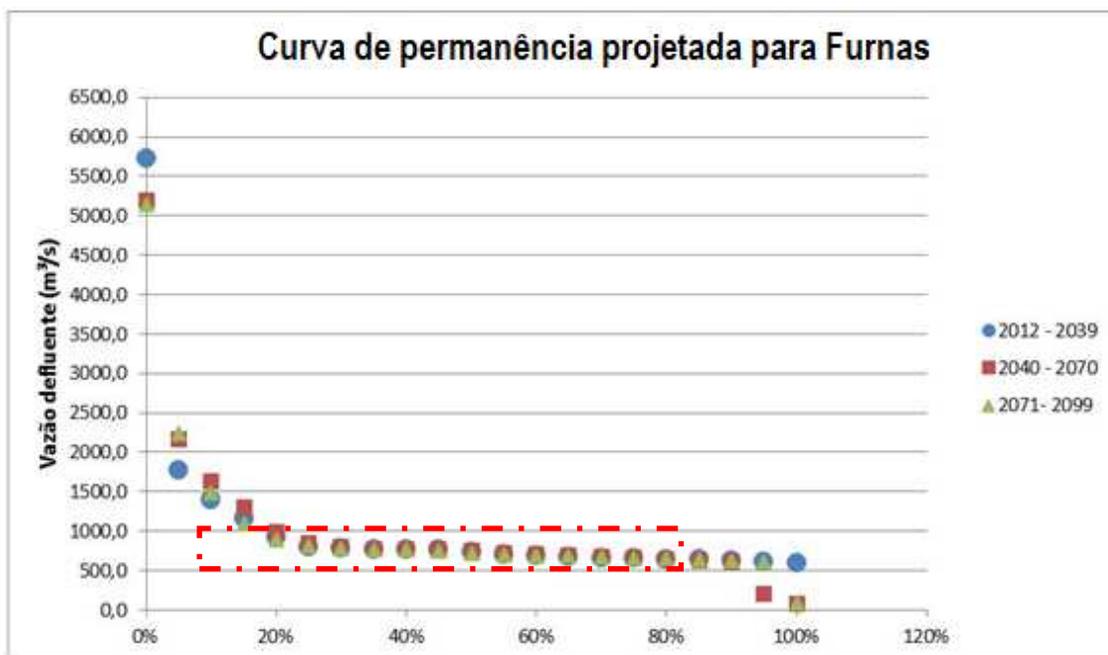


Figura 4.24: Projeção de vazão defluente de Furnas – Simulação 3.

Nesse caso, a vazão permanecerá mais de 40 % entre 800 e 1100 m<sup>3</sup>/s, possibilitando maior segurança para as atividades de jusante em função da minimização da sazonalidade. Quando se compara a permanência da vazão média, a diferença é ainda maior (Tabela 4.16).

Tabela 4.16: Permanência da vazão média em cada período.

Ano	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
2012 - 2040	28%	20%	45%
2041 - 2070	26%	21%	45%
2071- 2099	22%	20%	40%

Conforme pode ser observado, a Simulação 3, é a que melhor atende às necessidades dos usuários a jusante, interessados em maior regularização de vazões. Nesse caso, como a vazão afluente e defluente foram pré-determinadas, para a projeção do nível e geração de energia, será adotada a rotina de cálculo exemplificada para o mês de janeiro de 2014, na qual existe a seguinte condição:

Nível do reservatório no mês anterior: 766,3 m;

Vazão afluente projetada: 1447,9 m<sup>3</sup>/s;

Vazão defluente planejada: 688 m<sup>3</sup>/s,

Energia desejada: 371,7GWh.

Nesse caso, como a vazão afluente é superior à vazão defluente, o reservatório acumula água e atinge 97,1 % do volume útil, o que corresponde a cota 767,7 m, havendo a geração de 557,3GWh.

Contudo, para atender a essa regularização a jusante, o reservatório passa a ter maior variação do nível d'água, conforme Figura 4.25.

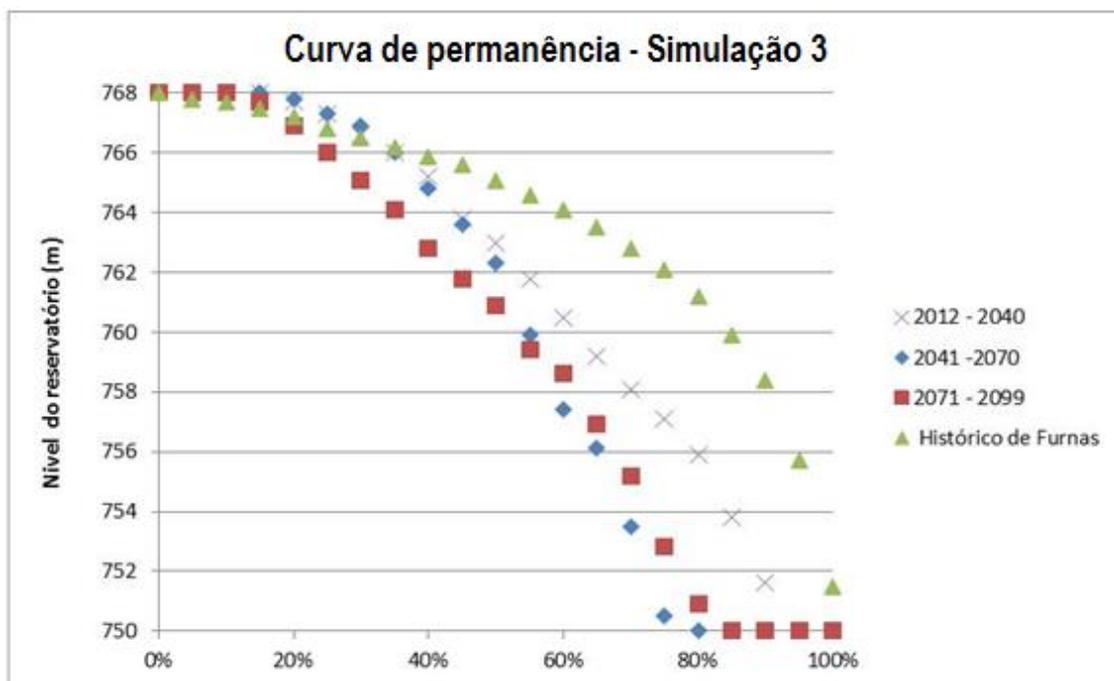


Figura 4.25: Curva de permanência de níveis projetada para Furnas.

Nessas simulações, projeta-se que o reservatório permanecerá grande parte do tempo abaixo do patamar desejado pela população de montante (cota 762 m), como por exemplo, o período de quase uma década entre agosto de 2057 e janeiro de 2066. Sendo assim, para ponderação do interesse de todos os usuários, essa simulação será utilizada como base para aplicação dos conceitos de frequência e duração.

Como um dos objetivos desta simulação é a redução de sazonalidade da vazão de jusante, a usina poderia utilizar mais de 70 % da sua capacidade (Tabela 4.17).

Tabela 4.17: Projeção de geração de energia para Furnas.

	<b>2012 - 2040</b>	<b>2041 – 2070</b>	<b>2071- 2099</b>	<b>Histórico de Furnas</b>
Energia em (GWh)	659,6	620,8	608,4	424,3
Geração em (%)	74,3	69,9	68,5	47,8

Nessas simulações, a análise energética teve como enfoque somente a usina de Furnas, não sendo analisado o impacto sobre o SIN. Considerando a geração de energia e a regularização de vazões, a Simulação 3 foi a que melhor ponderou o interesse dos usuários.

#### 4.4.2 Utilização do modelo de frequência e duração

Nesta seção serão aplicados os conceitos de frequência e duração, apresentados no Capítulo 3, com objetivo de ponderação do interesse de todos os usuários. Assim, conforme apresentado no Item 3.6, em um período de cinco anos, busca-se um sistema de operação do reservatório, de modo que a usina fique apenas dois ciclos distribuídos em 15 meses abaixo da cota 762 m: “Simulação 4”.

Para aplicação da metodologia, o primeiro passo é verificar se as condições de frequência e duração foram atendidas nos últimos cinco anos. Sendo assim, para atendimento a um ciclo anual completo e compatibilização dos cenários do IPCC, as simulações contemplarão o período de janeiro de 2012 a dezembro de 2099.

Deste modo, primeiramente foi verificado o comportamento do reservatório para os últimos cinco anos, 2007 – 2011 (Tabela 4.18). Com isso, pode-se verificar que as condições de frequência e duração foram atendidas, pois não houve registro abaixo do nível de referência. Assim, em janeiro de 2012, a UHE de Furnas pode programar a geração, sem restrições, conforme apresentado na Simulação 3.

Tabela 4.18: Cotas do lago de Furnas entre 2007 e 2011.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>2007</b>	764	767	768	768	768	768	767	766	765	764	763	762
<b>2008</b>	763	764	767	768	768	768	767	766	766	765	764	765
<b>2009</b>	767	768	768	768	768	768	767	767	766	766	766	766
<b>2010</b>	767	767	768	768	767	767	766	765	764	762	761	762
<b>2011</b>	766	767	768	768	768	768	767	766	764	764	762	764

As simulações seguiram até o instante em que as condições de frequência e duração não foram atendidas (Tabela 4.19).

Tabela 4.19: Projeção de níveis entre Novembro de 2013 e Outubro de 2018.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>2013</b>											764	766
<b>2014</b>	768	768	768	768	768	768	768	767	767	767	768	768
<b>2015</b>	768	768	768	768	767	766	765	764	762	760	760	762
<b>2016</b>	766	768	768	768	768	768	768	767	767	766	766	767
<b>2017</b>	768	768	768	768	767	766	765	763	761	760	758	757
<b>2018</b>	757	759	758	758	755	752	750	750	750	750		

Conforme metodologia, para o planejamento da operação no mês de Novembro de 2018, o histórico dos últimos cinco anos foi analisado (novembro 2013 a outubro de 2018), sendo observado que em 16 meses foram registrados níveis inferiores a cota 762, registrados em dois períodos (outubro e novembro de 2015 e setembro de 2017 a outubro de 2018). Nessa situação, como o objetivo é evitar que o reservatório continue esvaziando, ou que permaneça em um patamar tão baixo, 15%, da vazão afluyente será armazenada.

Assim, tem-se:

Nível do reservatório em outubro de 2018 = 750 m;

Vazão afluyente planejada para novembro de 2018 = 290,43 m<sup>3</sup>/s;

Vazão defluyente programada para novembro de 2018 = 290,43 x 0,85 = 246,87 m<sup>3</sup>/s;

Nível do reservatório programado para novembro de 2018 = 750,21 m.

Para a projeção do mês de Dezembro de 2018, repete-se o procedimento, ou seja, o primeiro passo é verificar o histórico dos últimos cinco anos (Tabela 4.20).

Tabela 4.20: Projeção de níveis entre Novembro de 2013 e Outubro de 2018.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>2013</b>												766
<b>2014</b>	768	768	768	768	768	768	768	767	767	767	768	768
<b>2015</b>	768	768	768	768	767	766	765	764	762	760	760	762
<b>2016</b>	766	768	768	768	768	768	768	767	767	766	766	767
<b>2017</b>	768	768	768	768	767	766	765	763	761	760	758	757
<b>2018</b>	757	759	758	758	755	752	750	750	750	750	750,21	

Nesse intervalo, foram verificados 16 registros de níveis inferiores à cota 762, em dois períodos. Nesta situação, tem-se:

Nível do reservatório em novembro de 2018 = 750,21 m;

Vazão afluente planejada para dezembro de 2018 = 642,24 m<sup>3</sup>/s;

Vazão defluente programada para dezembro de 2018 = 642,24 x 0,85 = 545,9 m<sup>3</sup>/s;

Nível do reservatório programado para dezembro de 2018 = 750,66 m.

Conforme apresentado, esse planejamento segue até dezembro de 2099, considerando uma janela móvel de cinco anos, mantendo a regra de armazenamento de 15 % da vazão afluente sempre que as condições de frequência e duração não forem atendidas.

Em termos comparativos, a Simulação 3, para o período entre 2012 e 2099, registrou 516 meses abaixo da cota 762, e após a aplicação da metodologia, houve um declínio para 239 meses, além da redução dos ciclos, conforme se apresenta em detalhes no Apêndice E.

Do ponto de vista energético, pode ser verificado que aplicação metodológica não traz danos para a produção de energia (Tabela 4.21).

Tabela 4.21: Projeção de geração de energia Simulação 4.

	<b>2012 - 2040</b>	<b>2041 - 2070</b>	<b>2071- 2099</b>	<b>Histórico de Furnas</b>
Energia em (GWh)	642,1	619,9	620,2	424,3
Geração em (%)	72,3%	69,8%	69,9%	47,8

Considerando as projeções defluentes, a vazão média de 930 m<sup>3</sup>/s permanece 45 % do tempo no curso d'água, fator esse de muita importância para a garantia das atividades que se desenvolvem a jusante.

A concepção de um método que pondere os interesses de jusante e montante em função de penalizações para variações significativas de cota e vazão, prosseguindo para fixação de duração e frequência, parece ser um mecanismo que pode auxiliar na ponderação de interesse não somente dos usuários diretamente relacionados às atividades do lago, mas também do bem coletivo como a geração de energia.

## 5 Conclusão e Recomendações

A utilização e manejo adequado dos recursos hídricos são de grande importância para a continuidade da vida terrestre e conseqüentemente para desenvolvimento de grande parte das atividades socioeconômicas. Dentre essas atividades, a geração de energia é uma das mais importantes, sendo que em nosso país, a maior capacidade instalada é proveniente da hidroeletricidade, de modo a enfatizar a importância da gestão dos recursos hídricos.

Devido à relevância no cenário energético, a UHE de Furnas foi adotada como estudo de caso. A construção do empreendimento ocasionou mudanças do uso e ocupação do solo da região, como a inundação de áreas férteis e proporcionou o desenvolvimento do turismo com a criação de uma rede de pousadas e hotéis às margens do reservatório. Por este motivo, a grande variação de nível d'água do lago, devido a necessidade de geração e regularização de vazões, gerou conflitos pelo uso da água, sendo necessário o aprimoramento de mecanismos de gestão, que ganham ainda mais relevância, caso as mudanças climáticas se concretizem.

Desde a década de 1980, parte da comunidade científica vem se dedicando a pesquisas relacionadas a mudanças do clima. Dessa forma, em razão da relevância do tema, resultou na criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Contudo, pode ser verificado que apesar de a maioria dos estudos apontarem para alterações do clima, não existe unanimidade entre os cientistas, e o assunto necessita de maiores investigações.

Os relatórios do IPCC, que estão em sua quarta edição, propõem quatro diferentes enredos ou cenários de desenvolvimento global futuro, com o objetivo de descrever e prever possíveis mudanças climáticas por meio de modelos atmosféricos globais. Entretanto, deve ser considerado que os cenários futuros do clima apenas são projeções de prováveis mudanças que possam vir a acontecer com a combinação de fatores, como: emissão de gases de efeito estufa e alterações de aspectos climáticos, demográficos, econômicos e tecnológicos.

Nesta tese foram utilizados dados do modelo global HadCM3 que representa bem a climatologia e a sazonalidade da região de estudo. No entanto, como os modelos globais possuem limitações devido à alta resolução e elevado custo computacional. Para contornar estas restrições, foi utilizada a técnica de "downscaling" para melhor representação dos processos físicos locais, por meio do modelo regional Eta que consegue representar a climatologia observada de modo satisfatório no período de validação entre 1960 a 1990.

Para o sistema elétrico, é importante que esses elementos sejam considerados para que se possa diminuir o risco de falha no fornecimento de energia elétrica, uma vez que o modelo atual trabalha sob coordenação e planejamento do ONS, baseado em modelos estocásticos, ou seja, no histórico de vazões e não incorporam possíveis alterações que possam ocorrer no clima, tampouco valores esperados de previsões de precipitação.

Neste trabalho, foram averiguadas evidências de alterações das variáveis hidrológicas precipitação e vazão, por meio de sete testes não paramétricos. Para isso, a primeira etapa foi analisar a disponibilidade de dados, sendo identificados 143 postos pluviométricos na bacia de estudo. Contudo, devido à indisponibilidade de dados, inconsistência, falhas, espaço amostral reduzido e a necessidade de abrangência do período de validação dos modelos climáticos, o número de postos foi restrito a 15 % do total, localizados na parte mais a montante da bacia, e com período de dados entre 1948 e 1998. Deste modo, pode ser verificado que existe necessidade de melhoria da infraestrutura de disponibilidade, coleta, tratamento e cobertura dos dados brutos.

Os resultados dos testes não paramétricos mostram tendência de aumento dos índices de chuva, sendo que em 40% dos postos essa elevação foi significativa, contudo não foram identificadas alterações nas distribuições do número de dias chuvosos. A análise estatística convergiu para os mesmos resultados,

o que demonstrou a eficácia deste estudo para os dados apresentados, contrapondo diversas pesquisas apresentadas, nos quais os autores não conseguiram o mesmo êxito.

Como esse fenômeno não foi uniforme para a região de estudo, o aumento do índice pluviométrico poderia relacionar-se à urbanização, que é um fenômeno decorrente do crescimento populacional, acarretando, por meio de diferentes formas de uso do solo, mudanças no ambiente que são representadas, especialmente, pela supressão da vegetação, gerando fatores que alteram o comportamento dos elementos meteorológicos e modificam o clima.

Entretanto, essa região está localizada na parte de montante das bacias hidrográficas, onde o efeito da ação antrópica não é tão significativa. Essa alteração pode ser permanente, o que caracteriza uma modificação no clima, como pode ser sazonal, de modo a ter uma variabilidade climática. Deve ser ressaltado que o baixo espaço amostral avaliado não é suficiente para que se tenham conclusões definitivas a respeito do comportamento do clima.

Com relação aos dados fluviométricos, foram identificadas tendências de aumento pouco significativas, que podem ser justificadas pela retirada da água sem a solicitação de outorga ou pelo fato que as estações pluviométricas, nas quais foram identificadas tendências de aumento, têm área de drenagem pouco significativa ou até mesmo pelo fato de as demais não analisadas não terem tendência de aumento. Todavia, esse fato não diminui a importância de replicar estudos similares em outras bacias pela grande importância dos recursos hídricos nas atividades cotidianas.

Para representação do clima futuro, foram utilizadas seis variáveis climatológicas projetadas pelo modelo Eta por meio de quatro membros (High, Medium, Low e Controle), dentro dos parâmetros do cenário A1B do IPCC, que foram bem ajustados a fim de prever condições futuras para o período de janeiro de 2011 até final de novembro de 2099, divididas nos períodos: 2011 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 a 2099 que serviram como dado de entrada para alimentar o modelo chuva-vazão – MGB desenvolvida pelos pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Na etapa de ajuste e calibração do modelo hidrológico, foram delimitadas 20 sub-bacias para o período de 1968 a 1990, que obtiveram boa correlação em relação aos dados observados, de tal modo que a ferramenta conseguiu representar bem o processo de transformação da precipitação em vazão.

Nas projeções de vazões pelo MGB, pode-se verificar que as previsões realizadas por meio do cenário *Medium* são as mais restritivas, no que se refere à oferta hídrica, e caso se confirmem, devem exigir maior atenção e controle por parte dos órgãos reguladores de recursos hídricos, pelo agravo da diminuição da oferta e risco de maiores conflitos pelo uso da água. Para a UHE de Furnas, caso esse cenário se confirme e para que a produção de energia se mantenha próxima dos patamares registrados no período de 1963 a 2001, será necessário maior esvaziamento do reservatório, de modo a proporcionar maiores conflitos pelo uso da água.

Deste modo, recomenda-se que a operação e planejamento do SIN seja aprimorada com a incorporação do sistema de previsão de vazões em todas as bacias e a inclusão de interesse de outros setores usuários além do energético. Assim, buscou-se o aprimoramento de uma metodologia para que as usinas trabalhem de modo a atender tanto a produção de energia como a necessidade da comunidade ribeirinha e de jusante.

Com base nos dados históricos da operação, prosseguiu-se para fixação da duração e frequência de transgressão de referência, tendo como base a cota 762 m. Como condição ideal para um período de cinco anos, foi estipulado que o reservatório deve ficar apenas dois ciclos distribuídos em 15 meses abaixo deste nível, que pode ser alcançado com adoção de uma regra operativa como o armazenamento de um percentual da vazão afluente planejado para o mês subsequente, sempre que as condições de frequência e duração supracitadas não sejam atingidas no período especificado. Essa regra pode ser exigida por meio de outorga ou outro marco legal.

Caso os cenários do modelo Eta se verifiquem e a UHE de Furnas continue a atender à mesma demanda média mensal de energia, o reservatório tende a permanecer mais cheio para o período de 2011 a 2100, se comparado ao ocorrido até os dias atuais. Esse feito se deve principalmente pelo fato de o modelo climático projetar maior oferta hídrica no período úmido. Entretanto, pode ser observado que para o triênio 2041 – 2070, devido a um período de estiagem prolongado, o reservatório poderá esvaziar-se por completo para que seja atendida a mesma demanda energética, o que deve ser evitado, pois certamente prejudicará as demais atividades que dependem do recurso hídrico disponível no lago.

A concepção de um método que pondere o interesse de jusante e montante em função de penalizações para variações significativas de cota e vazão, prosseguindo para fixação de duração e

frequência, parece ser um mecanismo que pode auxiliar na ponderação de interesse não somente dos usuários diretamente relacionados às atividades do lago, mas também do bem coletivo como a geração de energia.

Como resultado, verifica-se que Furnas pode atingir maior geração de energia, esvaziando o reservatório em menor intensidade. No entanto, o efeito sobre o SIN não foi analisado bem como a inserção de novas fontes de energia na matriz, sendo recomendado que se prossiga para o desenvolvimento desses estudos e outras pesquisas que conciliem os usos múltiplos da água.

Conforme apresentado, pode-se concluir que é importante o fortalecimento e a capacitação dos comitês de bacias hidrográficas e órgãos reguladores de recursos hídricos, que são agentes adequados para o auxílio às questões técnicas aqui apresentadas, para que se encontre o desenvolvimento sustentável e se conciliem possíveis conflitos futuros pelo uso da água.



## Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). HidroWeb: **Sistemas de Informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: junho de 2013.

ALAGO – **Associação dos usuários do lago de Furnas**. Disponível em: <<http://www.alago.org.br/default.asp?act=pagina&page=mapa>>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.

ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; TANK, A. M. G.; HAYLOCKM.; COLLINS, D.; TREVIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOU, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D.; BURN, J.; AGUILLAR, E.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VASQUEZ-AGUIRRE, J. L. **Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation**. J. Geophys. Res., v.111, D05109, 2006.

ALEXANDRE, G. R.; BAPTISTA, M. B.; NAGHETTINI, M. C. **Estudo para Identificação de Tendências do Regime Pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a Partir de Métodos Estatísticos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 15, p. 115-126, 2010.

ALMEIDA, R. A.; VIANA, A. N. C.; ALVES, A. S. V. **Impacto do deplecionamento de reservatórios de regularização no setor de turismo em municípios lindeiros: o caso do reservatório de Furnas**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo

AVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Estabilidade temporal do conteúdo de água em três condições de uso do solo, em uma bacia hidrográfica da região da Serra da Mantiqueira, MG.** Rev. Bras. Ciênc. Solo. vol.34, n.6, pp. 2001-2009, 2010

BACK, A.J. **Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BACK, A.J.; VIEIRA, H.J. **Análise da tendência temporal nos dados de chuva de Urussanga –SC.** 3º Simpósio Internacional de Climatologia, SIC, 2009, Canela RS. Anais.

BÁRDOSY, A.; PEGRAM, G. **Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology.** Water Resources Research, v.47, doi:10.1029/2010WR009689, 2011.

BLAIN, G. C. **Considerações estatísticas relativas a seis séries mensais de temperatura do ar da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 26, p. 279-296, 2011.

BLAIN, G. C.; LULU, J. **Valores anuais absolutos de séries diárias de temperatura máxima e mínima do ar no estado de São Paulo: tendências, periodicidades e probabilidades associadas.** Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso), v. 26, p. 29-40, 2011.

BLAIN, G. C.; MORAES, S. O. **Caracterização estatística de oito séries de precipitação pluvial máxima diária da secretaria de agricultura e abastecimento do Estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 26, p. 225-234, 2011.

BLAIN, G. C. **Precipitação pluvial e temperatura do ar no Estado de São Paulo: periodicidades, probabilidades associadas, tendências e variações climáticas.** 2010a. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010a. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/111131/tde-24052010-155135/>>. Acesso em: 2012-02-22

BLAIN, G. C. **Detecção de tendências monótonas em séries mensais de precipitação pluvial do estado de São Paulo.** Bragantia (São Paulo, SP. Impresso), v. 69, p. 1027-1033, 2010b.

BLAIN, G. C.; PICOLI, M. C. A.; LULU, J. **Análises estatísticas das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no Estado de São Paulo.** Bragantia (São Paulo, SP. Impresso), v. 68, p. 807-815, 2009.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, Walter; PILAR, Jorge Victor ; SILVA, B. C. ; TUCCI, Carlos. **Avaliação dos benefícios de previsões de vazão na operação de reservatórios**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, p. 197-213, 2009.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, WALTER; PILAR, JORGE VICTOR; SILVA, B. C.; TUCCI, CARLOS. **Operação de um reservatório com previsão de vazão sujeita a erros**. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, 2006, Curitiba. Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, Walter ; PILAR, Jorge Victor . **Otimização da operação de reservatórios: estado-da-arte**. In: XVI Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 2005, JOÃO PESSOA. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005. v. 1

CÂNDIDO, M. O. **SEAF - um protótipo de um sistema especialista para análise de frequência local de eventos hidrológicos máximos anuais**. Belo Horizonte, 2003. 174 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, meio ambiente e recursos hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

CBH – Furnas, Comitê da Bacia Hidrográfica do Entorno do Lago de Furnas – GD3. Disponível em: <<http://www.grande.cbh.gov.br/GD3.aspx>>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.

CCIS - Canadian Climate Impacts and Scenarios. Disponível em: <[http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?More\\_Info-Emissions](http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?More_Info-Emissions)>. Acesso em: 09 de novembro de 2012.

CHIARI, G. R. P; COSTA, J. C. E; BOTELHO, L. C. M. (2007) **Previsão de Afluências na Cemig: Aplicação do Sistema de Simulação Hidrológica Rio Grande para a Bacia Incremental do Rio Paranaíba entre as Uhe's Itumbiara e São Simão**. I Workshop Previsão de Vazões ONS, Rio de Janeiro (2007).

CHIEW, F.H.S.; TENG, J.; VAZE, J.; KIRONO, D.G.C. **"Influence of global climate models election on run off impact assessment"**. J. Hydrol., 379, 172-180. 2009.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. **Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs**. Clim Dyn. DOI: 10.1007/s00382-011-1002-8. 2011.

CHOU, S.C.; BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J.L. (2005) **"Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America"**. Nonlinear Process in Geophys 12(4):537–555. doi:10.5194/npg-12-537-2005.

CLIMATE PREDICTION. NET. Disponível em: <<http://www.climateprediction.net>>. Acesso em: 1 de Outubro de 2012.

COLLISHONN, B.; COLLISCHONN, W.; SILVA, C. B.; TUCCI, C. E. M. **Simulação hidrológica da bacia do rio São Francisco usando precipitação estimada pelo satélite TRMM: resultados preliminares.** Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB. 2005.

COLLISCHONN, B.; Paiva, R. C.; Collischonn, W.; MEIRELLES, F.; CAMANO, E.; FAN, F. **Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, p. 119-134, 2011.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; DELGADO, M. C.; SILVA, B. C.; COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D. G.; PAZ, A. R. **Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na bacia do rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, p. 43-56, 2007.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias.** Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 194 páginas. 2001.

CORRÊA, ADRIANA S. P. *et al.* **Avaliação das Perdas Econômicas nos Empreendimentos no entorno de Furnas,** Unifei, Itajubá, (2006).

COSTA, F. S.; MACEIRA, M. E. P.; DAMÁZIO J. M. **Modelos de Previsão Hidrológica Aplicados ao Planejamento da Operação do Sistema Elétrico Brasileiro.** RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 12 n.3 Jul/ Set 2007, 21-30.

COX, P.; BETTS, R.; BUNTON, C.; ESSERY, R.; ROWNTREE, P.R.; SMITH, J.: **“The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity”.** Climate Dynamics 15: 183-203. 1999.

CHRISTENSEN, J.H.; HEWITSON, B.; BUSUIOC, A.; CHEN, A.; GAO, X.; HELD, I.; JONES, R.; KOLLI, R.K.; KWON, W.T.; LAPRISE, R.; MAGAÑA RUEDA, V.; MEARN, L.; MENÉNDEZ, C.G.; RÄISÄNEN, J.; RINKE, A.; SARR, A.; WHETTON, P.; **Regional climate projections.** In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. (eds) **Climate change 2007: the physical science basis. Chap 11, contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, UK, 2007.

CUSACK, S.; SLINGO, A.; EDWARDS, J.M.; WILD, M. **“The radiative impact of a simple aerosol climatology on the Hadley Centre GCM”.** *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 124: 2517-2526. 1998.

DORAN, P.T.; ZIMMERMAN, M.K. **Examining the scientific consensus on climate change**.EOS. Transactions American Geophysical Union 90, 22–23. 2009.

EDWARDS, J.M. AND A. SLINGO, 1996: **Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large scale model**. Quart.J. Roy. Meteor. Soc. 122: 689-719.

ENGEL, E. **Conflitos De Uso Das Águas De Furnas**, O Estado das Águas no Brasil, pág.107 a 109. 2002.

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 20 de Outubro de 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**. Rio de Janeiro, 2012.

FERNANDES, C. T. C.; BURSZTYN, M. A. A. **Usos múltiplos das águas de reservatórios de grandes hidrelétricas: perspectivas e contradições ao desenvolvimento regional sustentável**. In: IV Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2008, Brasília - Df. Anais do IV Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2008.

FEITOSA, S. M. R. **Alterações climáticas em Teresina-PI decorrentes da urbanização e supressão de áreas verdes**. Dissertação de mestrado apresentado a Universidade Federal do Piauí, 2010.

FECHINE, J. A. L.; GALVÍNIO, J. D. **Aplicação do teste de Menn Kendall na análise de tendências climáticas - bacia hidrográfica do rio brigida estado de Pernambuco**. In: Giovanni Seabra José Antonio Novaes da Silva Ivo Thadeu Lira Mendonça. (Org.). A conferência da Terra: aquecimento global, sociedade e biodiversidade. João Pessoa: Universitária, 2010, v. 1, p. 17-24.

FREI, C.; DAVIES, H.C.; GURTZ, J.; SCHÄR, C. **Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in Central Europe**. Integrated Assessment, 1, 281-299, 2000.

FURNAS.- **Furnas Centrais Elétricas S. A.** (2012).Disponível em: <<http://www.furnas.com.br>>. Acesso em: 5 de Junho de 2012.

GFDL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton University, 9 maio de 2011. Disponível em: <<http://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling>>. Acesso em: 12 de julho de 2012.

GIORGI, F.; BI, X.; PAL, JS. **“Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. I: present day climate (1961–1990)”**. Clim Dyn 22:733–756. doi: 10.1007/s00382-004-0467-0. 2004.

GOOSSENS, Ch.; BERGER, A. **Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century**. Annales Geophysicae. 4,B 4. p.385 – 400. 1986

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C.; BANKS, H.; GREGORY, J.; JOHNS, T.; MITCHELL, J. AND WOOD, R. 2000: **“The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a coupled model without flux adjustments”**. Climate Dynamics, 16: 147-168, 2000.

GROPPO, J. D.; MORAES, J. M.; GENOVEZ, A. M.; MARTINELLI, L. A. **Estudo de tendência de parâmetros de qualidade de água na bacia do rio Piracicaba**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, p. 79-87, 2006.

GROPPO, J. D.; MILDE, L. C. E.; MORAES, J. M.; GUAMERO, M. E.; MARTINELLI, L. A. **Análise de séries temporais de vazão e de precipitação na bacia do rio Piracicaba**. Revista de Ciência e Tecnologia da UNIMEP, Piracicaba, v. 8, n. 18, p. 109-117, 2001.

HADLEYCENTRE. Disponível em:< <http://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadcm3>>. Acesso em: 31 de julho de 2012.

HAY, L. E; CLARK, M. P. **“Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States”**. Journal of Hydrology. V. 282, p.56-75. 2003.

HUGHES, D. A.; KINGSTON, D. G., TODD, M. C. **“Uncertainty in water resources availability in the Okavango River basin as a result of climate change”**. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 931–941, doi:10.5194/hess-15-931-2011. 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default\\_prod.shtm#TOPO](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#TOPO)>. Acesso em: 23 de Outubro de 2012.

IGA - Instituto de Geociências Aplicadas. Disponível em: <<http://www.iga.com.br>>. Acesso em: 21 de Outubro de 2012.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 17 de julho de 2012. 2012a

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE: Special Report of Working Groups I and II: **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 582 pp, 2012b

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2007a), 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, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. 2007

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE: Climate Change 2007: **The Physical Science Basis- Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report**. Brussels, February 2007a.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE: **Climate Change 2007: Synthesis Report Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report**. Valencia, November 2007b.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE, Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas – QRA. **Climate Change 2007**: Synthesis Report, Valencia, November 2007c.

IPCC - INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE. **Change 2001: The scientific on climate change**. Climate basis IPCC WG I, TAR. Cambridge Univ. Press, 881p. 2001a

IPCC - INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE. **Climate Change 2001: Impacts Adaptation and Vulnerability**. A Report of working group II of Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001b.

IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Avaliação de benefícios da previsão meteorológica na operação de reservatórios com usos múltiplos**. Texto apresentado ao concurso do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. 2006

JONES, R.G.; NOGUER, M.; HASSELL, D.; HUDSON, D.; WILSON, S.; JENKINS, G.; MITCHELL, J. (2004) **Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS**, Hadley Centre for Climate Prediction and Research. *Met Office* Hadley Centre, UK, p 40

KAISER, I. M.; PORTO, R. M. **Uso de campos de precipitação obtidos via radar e pluviômetros em modelo hidrológico distribuído**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2005. v. 1

KERR, R.A. **Storm-in-a-Box Forecasting**. *Science*. Vol.304, mai, p.946-948. 2004.

KIMURA, R. "**Numerical weather prediction**". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.V.90, p.1403-1414. 2002.

KUNDZEWICZ, Z.W.; ULBRICH, U.; BRUCHER, T.; GRACZYK, D.; KRUGER, A.; LECKEBUSCH, G.C.; MENZEL, L.; PINSKWAR, I.; RADZIEJEWSKI, M. E SZWED, M. **Summer floods in central Europe: climate change track?** Nat. Hazards, 36, 165-189. 2005.

LABADIE, J. W. **Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review**. Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 130(2), p. 93-111. 2004.

LÁZARO, Y. M. C.; SILVEIRA, C. S. E FILHO F. A. S. "**Avaliação de desempenho dos modelos do IPCC-AR4 no nordeste setentrional do Brasil quanto à variabilidade plurianual da precipitação no século XX**". XIX Simpósio de Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Maceió, Dezembro de 2011.

LENDERINK, G.; BUIHAND, A.; VAN DEURSEN, W. **Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach**. Hydrology and Earth System Sciences, v. 11, n. 3, p. 1145–1159. 2007

LOPES, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; BRANDÃO, J. L B. **Operação de Sistemas Hidroelétricos com Usos Múltiplos**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Desafios à Gestão da Água no Limiar do Século XXI, 2003. v. 1. p. 174-174.

LOUZADA, A. F. **Conflitos por múltiplos usos da água no reservatório da UHE de Tucuruí. 2009**. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2009. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

MACEIRA, M.E.P., TERRY, L.A., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M. e MELO, A.C.G. (2002): **Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System**, in Anais do XIV Power Systems Computation Conference, session 43, paper 1, Sevilla, Spain.

MARENGO J. A.; NOBRE, CARLOS; CHOU, SC ;TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES, LINCOLN M.; OBREGON, G; SOARES, W.; BETTS, R.; KAY, G . **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil**.Projeto colaborativo realizado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o *Met Office* Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido, 2011a.(Relatório de pesquisa).

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES W. R.; SANTOS, D.C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. **“Development of regional future climate changes cenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins”**. Clim. Dyn. 2011b. Submetido.

MARENGO, J. A.; AMBRISI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUARTA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. **“Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models”**. ClinDyn. DOI 10.1007/s00382-009-0721-6. Dezembro, 2009.

MARENGO J. A. **Water and Climate Change**. Estudos Avançados (USP. Impresso), v. 22, p. 83-96, 2008

MIGLIORINI, S. M. S.; SOUSA, L. F.; BIESEK A. S.; RITTER, C. **A necessidade de se planejar o uso turístico do lago do reservatório da usina Salto Osório – Paraná: atividades turísticas desenvolvidas no local e os consequentes impactos ambientais**. Revista Geografar Curitiba, v.5, n.2, p.115-142, jul./dez. 2010. Disponível em: [www.ser.ufpr.br/geografar](http://www.ser.ufpr.br/geografar). Acesso em: 7 de Abril de 2013

MISRA, V.; P. A. DIRMEYER, B. P. KIRTMAN.2003: **Dynamic Downscaling of Seasonal Simulation over South American**. *J. Climate*, 2003, 16, 103-117.

MOLION, L. C. B. **Mitos do Aquecimento Global**. Revista Plenarium, v.5, n.5, p. 48 - 65, out., 2008. Disponível em: <<http://bd.camara.gov.br>>. Acesso em: 8 de maio de 2013.

MORAES, J. M.; GENOVEZ, A. M.; MORTATTI, J.; BALLESTER, M. V.; KRUSCH, A. V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. **Análise de Intervenção das Séries Temporais de Vazão dos Principais Rios da Bacia do Rio Piracicaba**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol.2, nº.2, 1997.

MORTATTI, J.; BORTOLETTO JUNIOR, M J; MILDE, L C E.; PROBST, J L. **Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia**. Revista de Ciência & Tecnologia, Piracicaba, v. 12, n. 23, p. 55-67, 2004.

MÜLLER, I. I.; KRÜGER, C. M.; KAVISKY, E. E. **Análise de Estacionariedade de Séries Hidrológicas na Bacia Incremental de Itaipu**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 3, 51 – 71, 1998.

NAKICENOVIC ,N.; DAVIDSON, O.; DAVIS, G.; GRUBER, A.; KRAM, T.; LA ROVERE, E. L.; METZ, B.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; SANKOVSKI, A.; SHUKLA, P.; SWART, R.; WATSON, R.; DADI, Z. **Relatório Especial Sobre Cenários de Emissões – RECE**. Working Group III Contribution to the Third Assessment Report, IPCC.27 p. 2000.

NICOLINI, M.; P. SALIO, J. J. KATZFEY, J. L. MCGREGOR, A. C. SAULO. 2002: **January and July regional climate simulation over South American**. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107, NO. D22, 4637.

NOBRE P.; MALAGUTTI, M. 2004: **Uma avaliação do modelo de circulação geral do CPTEC para estudos de modelagem acoplada oceano-atmosfera**. XIII Cong. Bras. De Meteorologia, Fortaleza, Brasil, (in CD-ROM), 2004.

NÓBREGA, M. T.; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. ;PAZ, A. R.. **Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil**. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, p. 585-595, 2011.

OLIVEIRA, F. A.; MELO, E. L.; FIGUEIREDO, J. C.; PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, R. G. **Impacto do uso de vazões naturais em estudos hidrológicos**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 13 n.2 Jul/Set 2008, 191-197.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Disponível em: <<http://www.ons.com.br/>>. Acesso em: 2 de Maio de 2013.

PACA, V. A. M. (2008). **Análise de informações satelitais e dados convencionais da rede pluviométrica como contribuição a modelagem hidrológica na região Amazônica - Estudo de caso: bacia do Rio Guamá – Pará**. Dissertação de mestrado apresentado a Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil. 2008.

PAIVA, E. M. C D.; CLAKE, ROBIN T. **Análise de tendência de precipitação na Amazônia**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 10(1/2): 37-41, 1995.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.. **Geração de direções de fluxo para modelagem hidrológica de grande escala**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI SBRH, 2005.

PEZZA, A.; SIMMONDS, I. **The first South Atlantic Hurricane: unprecedented blocking, low shear and climate change**. *Geophysical Research Letters*, v. 32 (L15712), 2005.

PIÃO, A. C. S.; ANGELIS, D. de F de; NALIN, D. A.; PENTEADO, A. M. **Modelos Estatísticos para Avaliar Tendências Mediante Análise de Parâmetros Físicos e Químicos em Bacia Hidrográfica**. In: 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications (DINCON 2008), 2008, Presidente Prudente. DINCON 2008, 2008.

PEREIRA, V. R.; TEIXEIRA FILHO, J. **Estiagem e alterações das funções hidrológicas: o caso do reservatório de Atibainha.** GEOUSP - Espaço e Tempo, São Paulo, Nº 30 - pp. 160 - 171, 2011.

PETTITT, A. N. **A Non-parametric Approach to the Change-point Problem.** Appl. Statistic, v.28, n.2, p.126-135. 1979.

RIBEIRO, W. C. **Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil.** Parcerias Estratégicas (Brasília), v. 27, p. 297-321, 2008.

RIBEIRO JUNIOR, L. U. **Contribuições metodológicas visando a outorga de recursos hídricos para geração hidrelétrica.** Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Itajubá, 157páginas. 2004

ROADS, J.; CHEN, S.-C; KANAMITSU, M. U.S. **Regional climate simulations and seasonal forecasts.** Journal of Geophysical Research. V.108, n.16, p.1(1-17). 2003.

RODRIGUES, R. A.; SANTOS, R. S. **Estudo de tendência climática na série temporal de precipitação pluviométrica em Araguari (MG).** Revista Geográfica Acadêmica, v. 1, p. 20-27, 2007.

ROS, D. A.; BARROS, M. 2003. **Otimização da operação de sistemas hidroenergéticos: impactos de diferentes objetivos.** XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba.

ROSE, D. **The Great Green Con no. 1: The hard proof that finally shows global warming forecasts that are costing you billions were WRONG all along .**The Daily Mail, Disponível em: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2294560/The-great-green-1-The-hard-proof-finally-shows-global-warming-forecasts-costing-billions-WRONG-along.html#ixzz2StLaQujf>>. Acesso 15 de Maio de 2013a.

ROSE, D. **Global warming stopped 16 years ago, reveals Met Office report quietly released and here is the chart to prove it.** The Daily Mail. Disponível em: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2217286/Global-warming-stopped-16-years-ago-reveals-Met-Office-report-quietly-released--chart-prove-it.html#ixzz2StmJo94X>>. Acesso em: 16 de Maio de 2013b.

SANTANA, T. B.; SILVA, B. C.; SANTOS, A. H. M. **Análise de Tendências de Longo Prazo em Séries de Vazões: Estudo de caso na bacia do Alto Rio Grande (MG).** In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2011

SANTOS, A. A. M.;(2002). **Administrando Conflitos – O caso do lago de Furnas,** O Estado das Águas no Brasil, pág.411 a 417.

SANTOS, I. FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. C. **Hidrometria Aplicada**, LACTEC, Curitiba- PR, 2001.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Simulação Hidrológica da Bacia do Rio São Francisco Usando Precipitação Estimada Pelo Satélite TRMM: resultados preliminares**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - INTEGRANDO A GESTÃO DE ÁGUAS ÀS POLÍTICAS SOCIAIS E DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 2005.

SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; LÁZARO, Y. M. C.; FERNANDES, W. S.; "Avaliação de Desempenho dos Modelos de Mudança Climático do IPCC-AR4 quanto a sazonalidade e os Padrões de Variabilidade Interanual de Precipitação Sobre a América do Sul". XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Maceió, Novembro de 2011.

SNEYERS R. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Note Technique No. 143 OMM – no. 415, Genève, 192p. 1975.

SOUZA, OKKY. "O dogma derrete antes das geleiras". Artigo publicado na revista Veja na edição 2153, de 24 de fevereiro de 2010. Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/240210/dogma-derrete-antes-geleiras-p-094.shtml>>. Acesso em: 20 de Maio de 2013.

THORNE, R. "Uncertainty in the impacts of projected climate change on the hydrology of a subarctic environment: Liard River Basin". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 1483–1492, doi: 10.5194/hess-15-1483-2011. 2011

TREUT, H. L.; GASTINEAU, G.; LI, L. **Uncertainties attached to global or local climate changes**. *External Geophysics, Climate and Environment*. p 584 - 590. 2008.

TUCCI, C. E. M **Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos**. Estudo preparado como contribuição da ANA – Agência Nacional de Águas para a Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. Maio de 2002.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; DIAS, P. L. S.; COLLISCHONN, W. **Previsão de médio prazo da afluência de reservatórios com base na previsão climática**, Projeto: BRA/00/29, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ Instituto de Agronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. 2002.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: Enfrentando a Escassez**. São Carlos, Editora: RIMA, 2003.

ULTREMARE, F.; ASSAD, E. D. **Validação do Zoneamento de Riscos Climáticos como Instrumento de Indução Tecnológica: caso do Milho e Soja**. In: XVI CBA - Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2009, Belo Horizonte. Mudanças Climáticas Recursos Hídricos e Energia para uma Agricultura Sustentável. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009. v. 1.

VALVERDE, M. C.; MARENGO, J. A. **"Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetado pelos modelos globais do IPCC AR4"**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.1, 125 - 145, 2010.

VILAS BOAS, C. L. **Uso múltiplo de reservatórios**. In: Seminário da Engenharia Comemorativo ao Dia Mundial da Água, Goiânia, 2006. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 9 de Abril de 2013.

VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A.; MORAES, J.M.; BALLESTER, M.V.; KRUSCHE, A.V.; PELLEGRINO, G.; ALMEIDA, R.M.B.; RICHEY, J.E. **Surface air temperature variations in the Amazon Region and its borders during this century**. *Journal of Climate*, Zurich, v.11, n.5, p.1105-1110, 1998.

XU, H.; TAYLOR, R.G.; XU, Y. **"Quantifying uncertainty in the impacts of climate change on river discharge in sub-catchments of the Yangtze and Yellow River Basins, China"**. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 333–344, doi:10.5194/hess-15-333-2011. 2011.

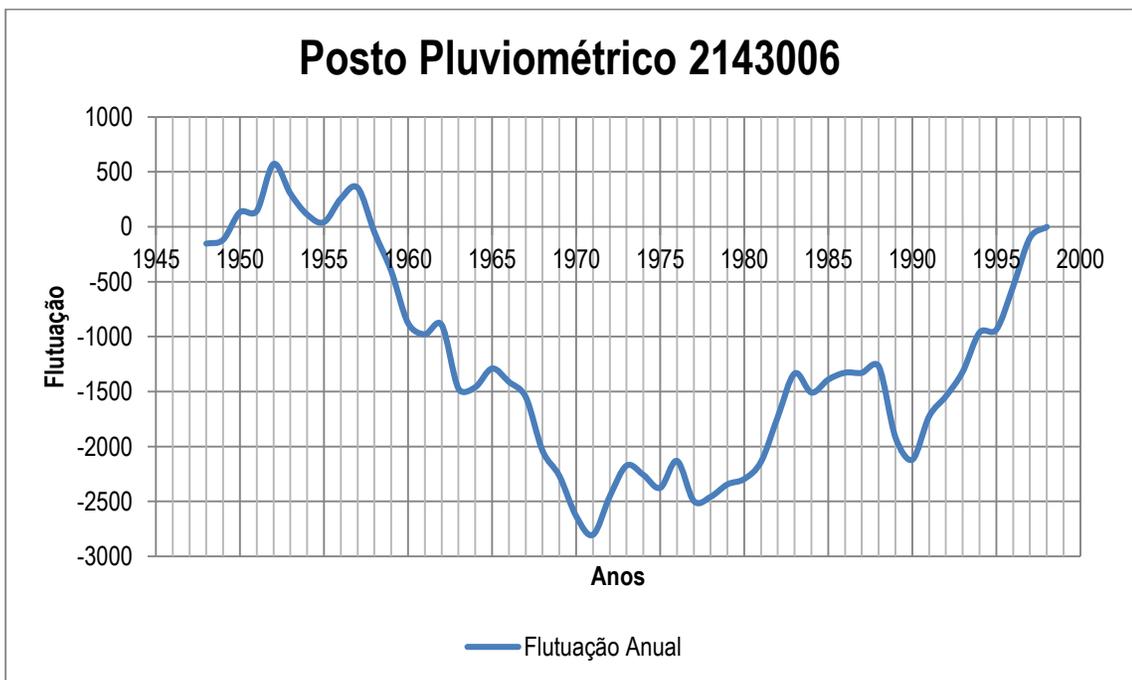
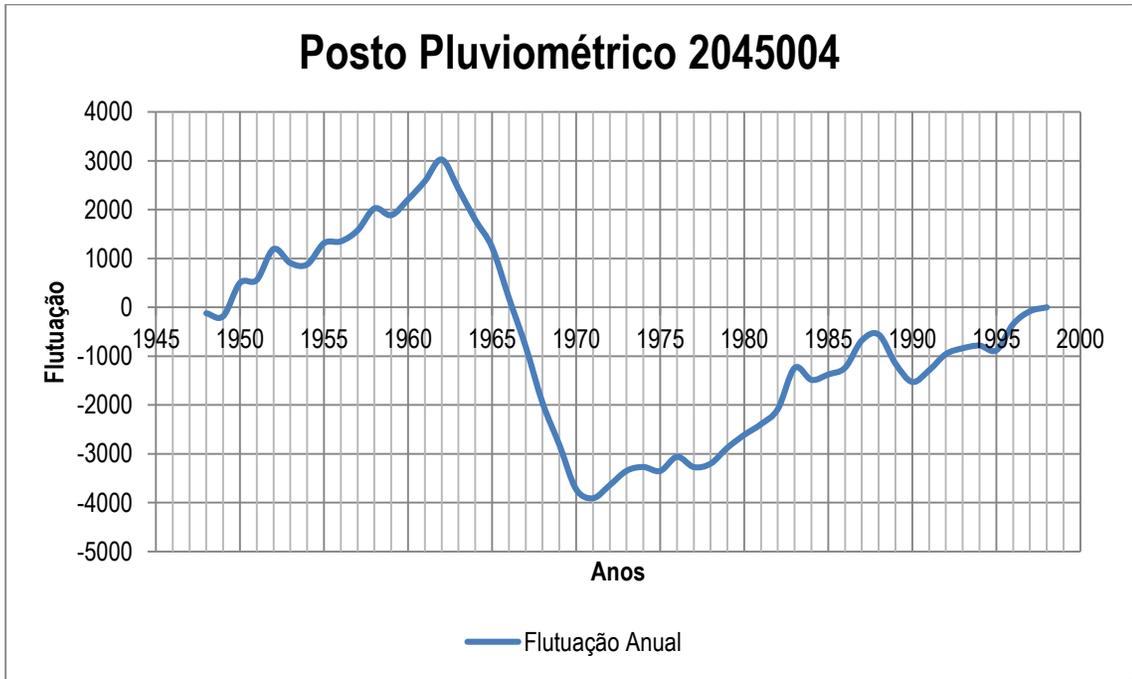
WHITMARSH, L. (2011). **Scepticism and uncertainty about climate change: Dimensions, determinants and change over time**. *Global Environmental Change*, p. 690 - 700.

WMO - World Meteorological Organization. Disponível em:  
<[http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate\\_models.php](http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_models.php)>. Acesso em: 2 de Agosto de 2012.

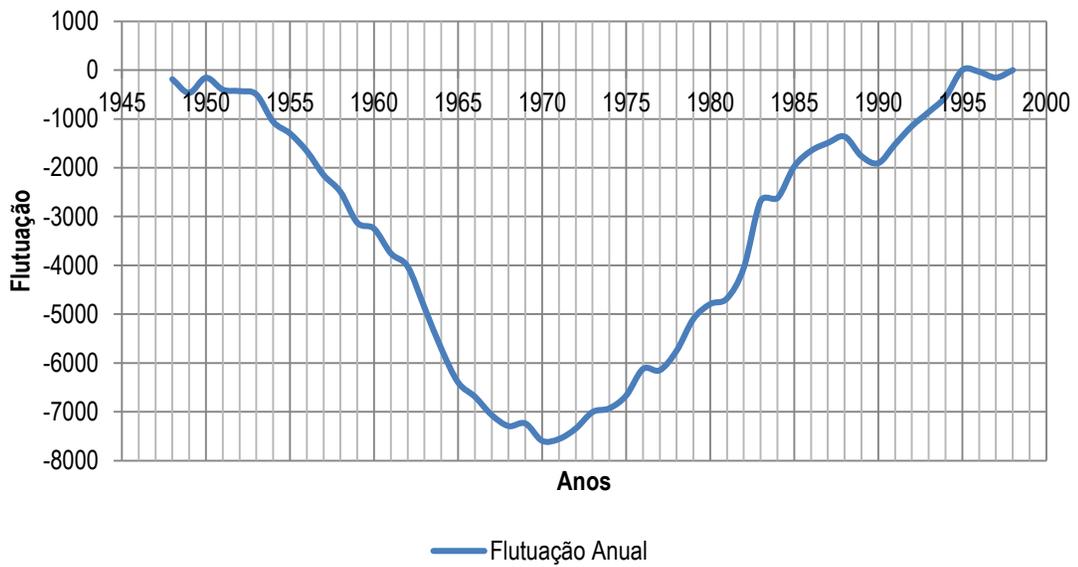


## Apêndices

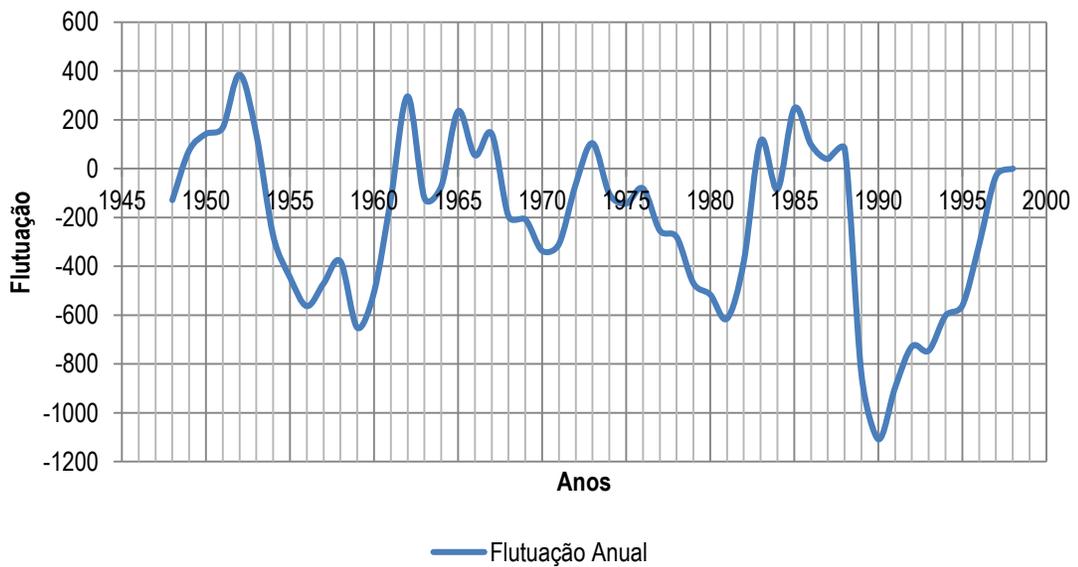
Apêndice A – Flutuação Anual



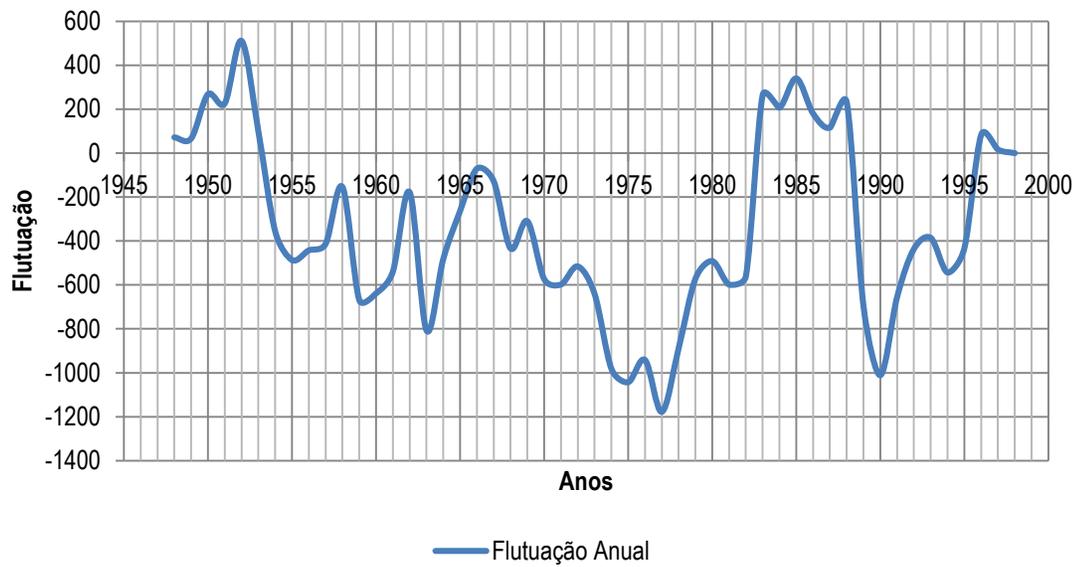
### Posto Fluviométrico 2143008



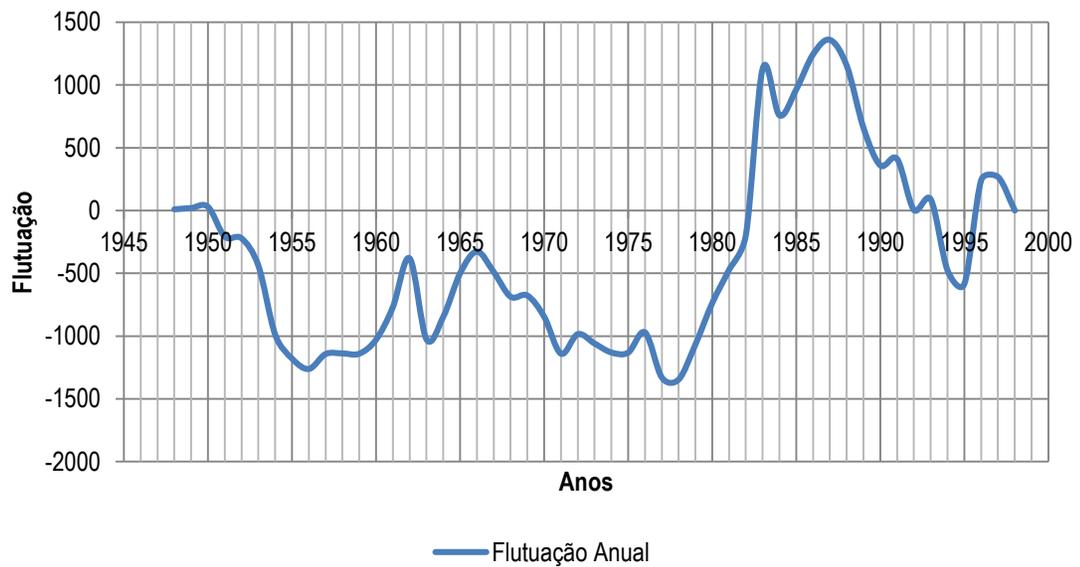
### Posto Pluviométrico 2143009

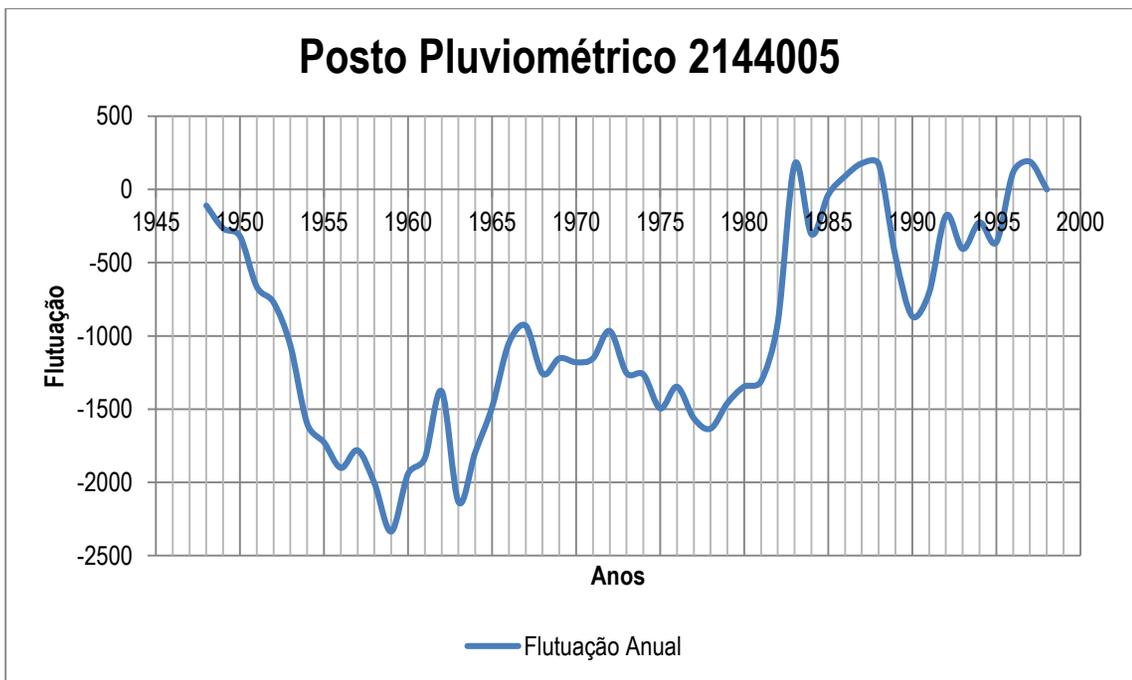
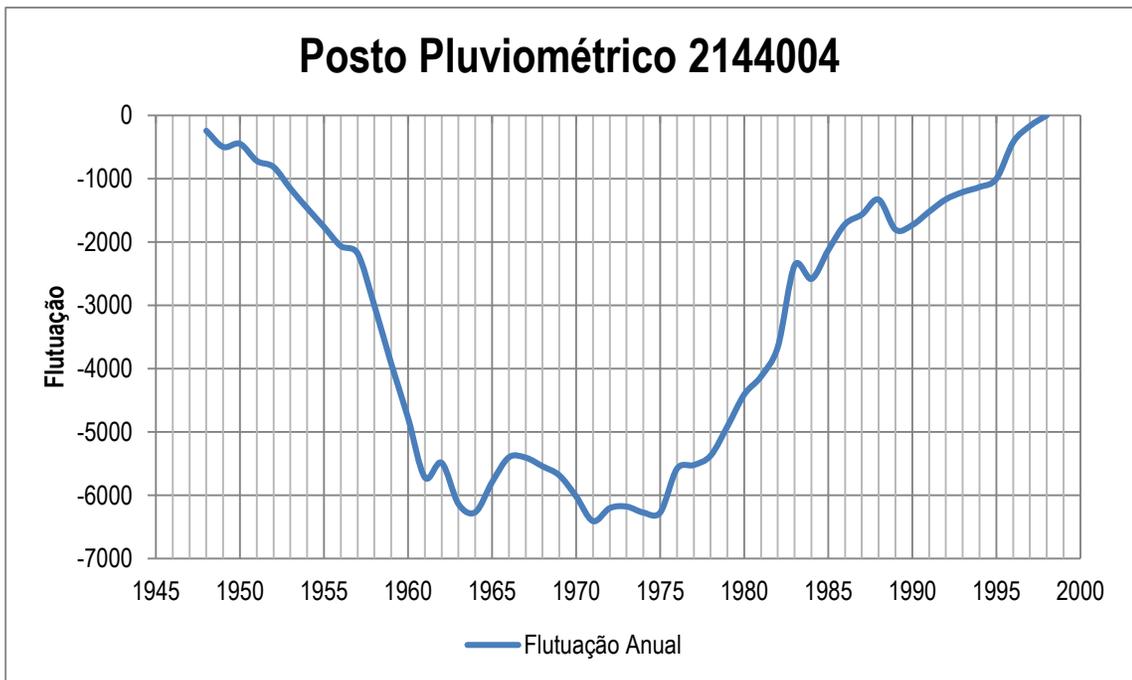


### Posto Pluviométrico 2144002

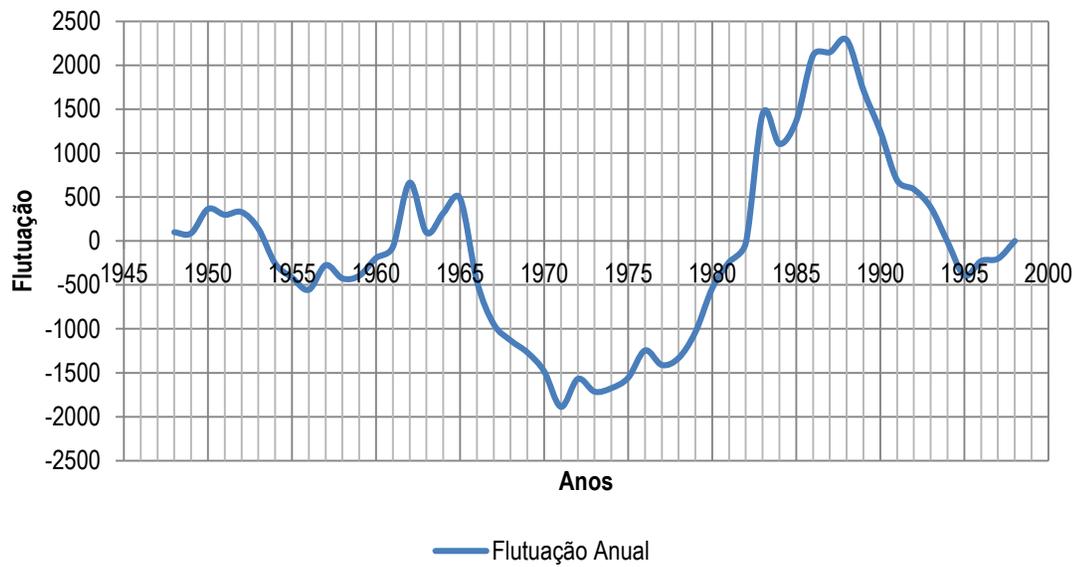


### Posto Pluviométrico 2144003

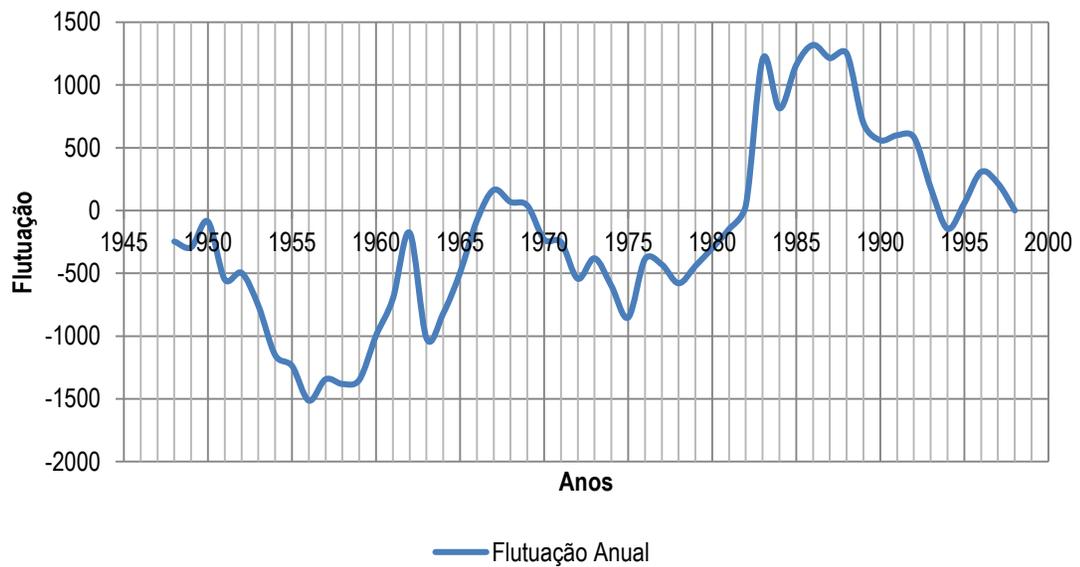




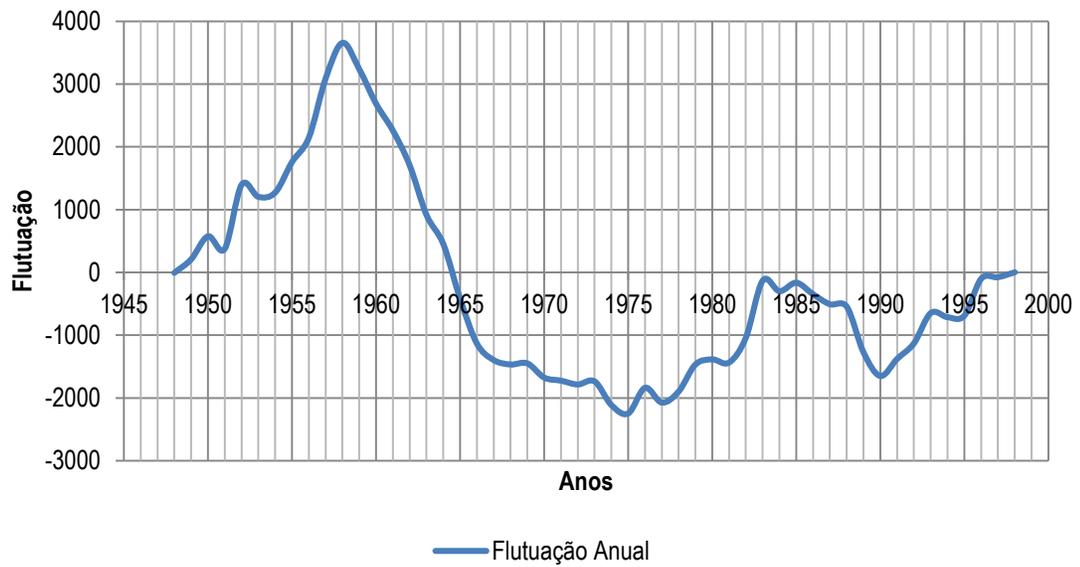
### Posto Pluviométrico 2144006



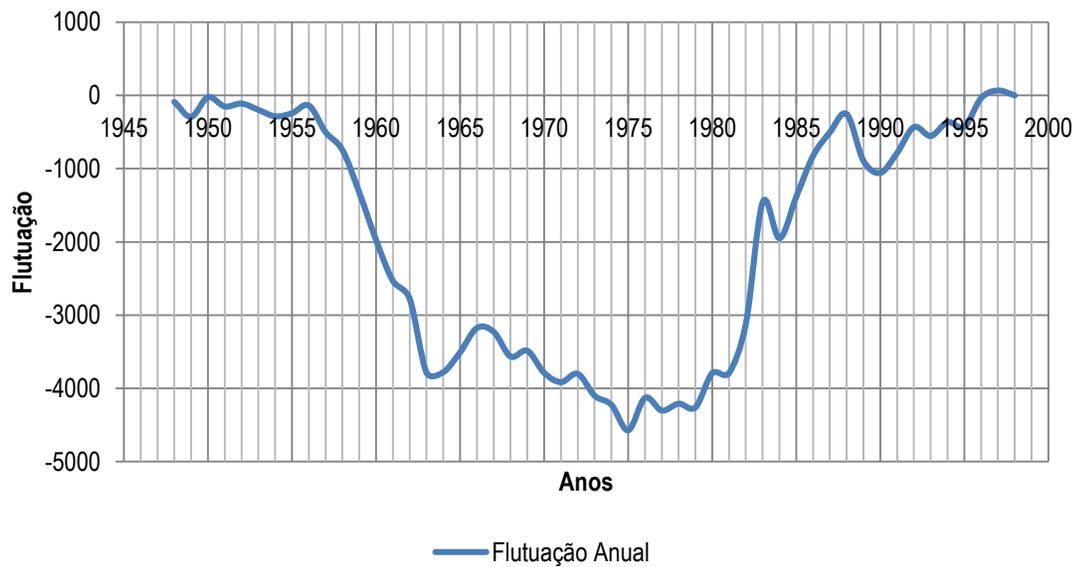
### Posto Pluviométrico 2144007



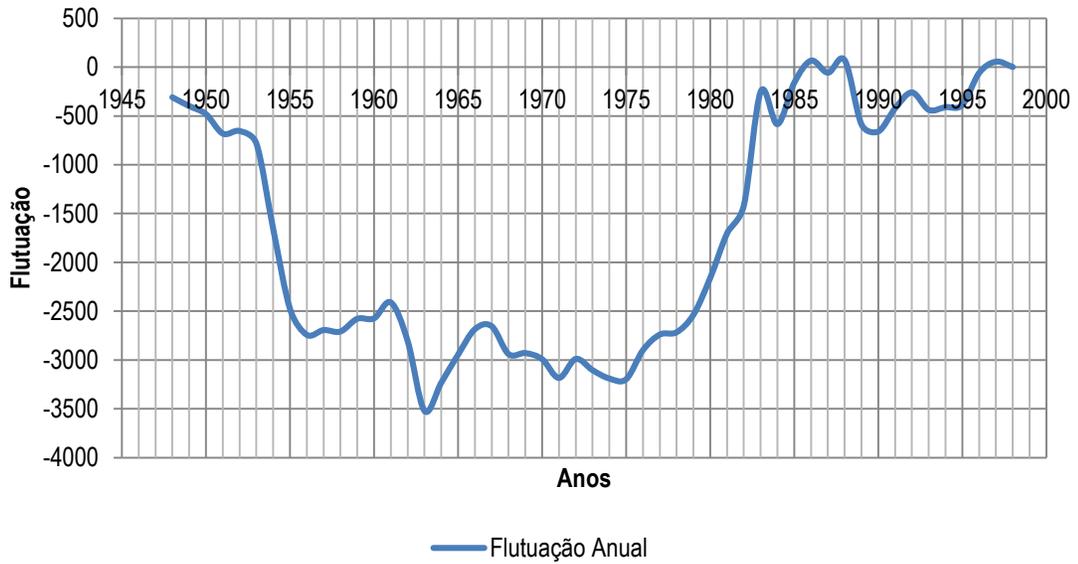
### Posto Pluviométrico 2144009



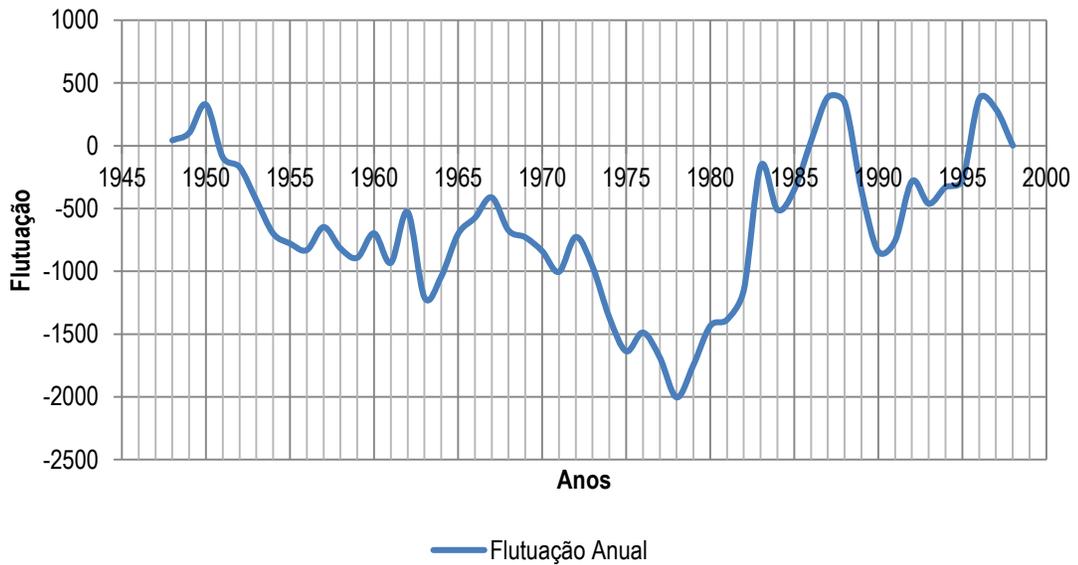
### Posto Pluviométrico 2144018



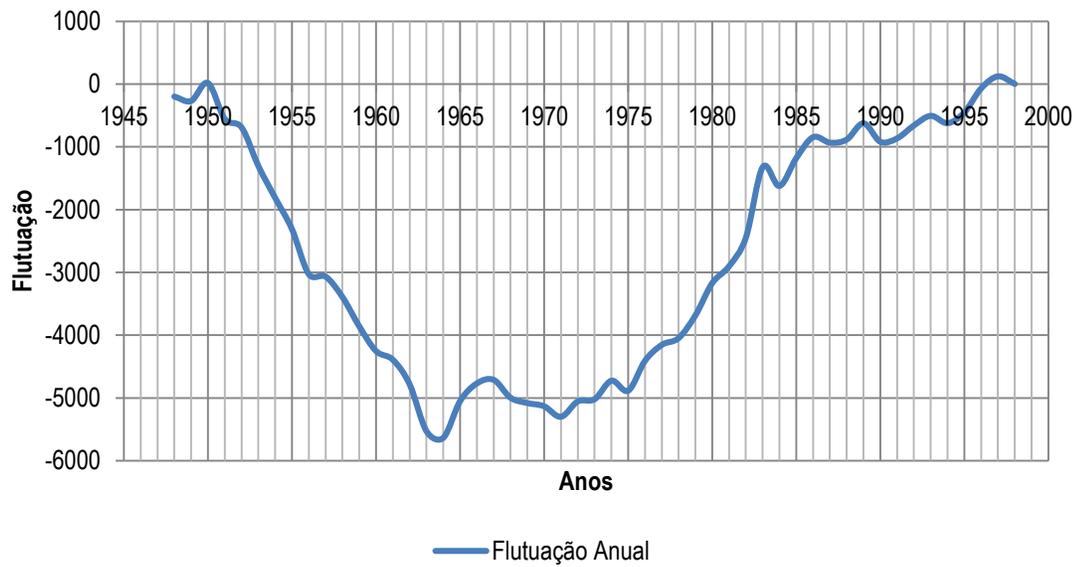
### Posto Pluviométrico 2145001



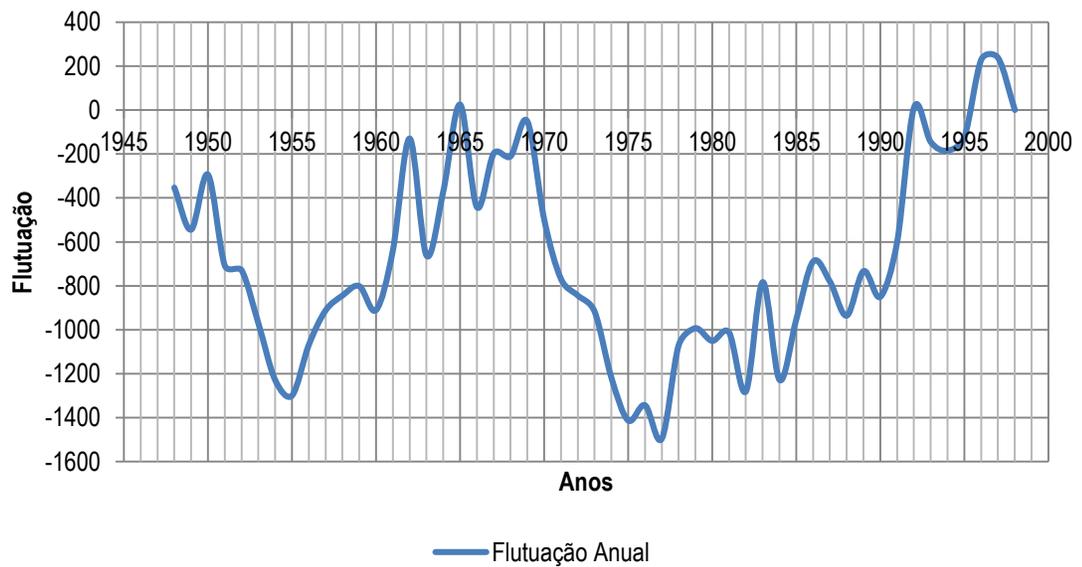
### Posto Pluviométrico 2145007



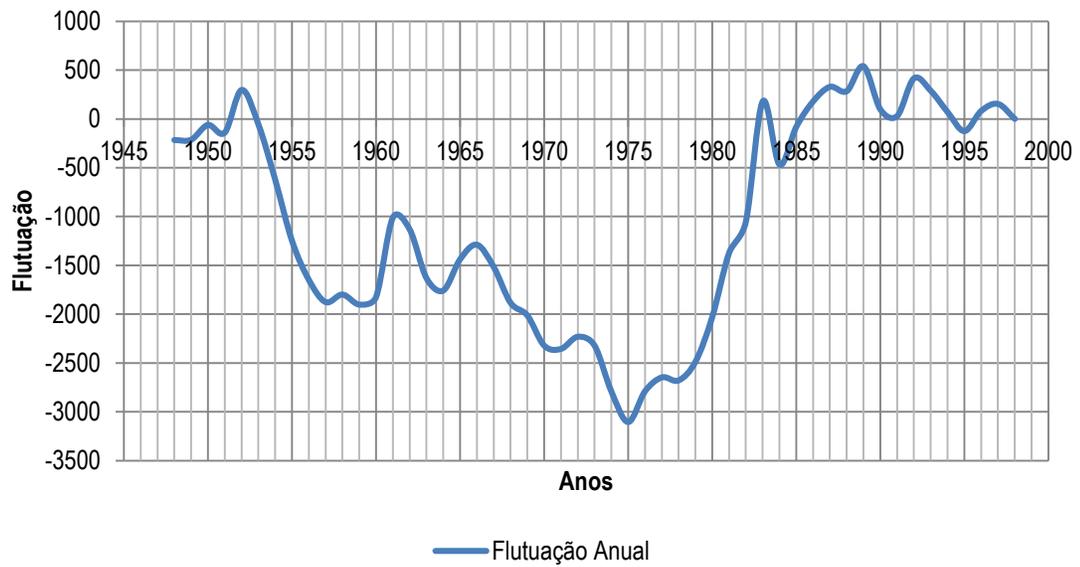
### Posto Pluviométrico 2145009



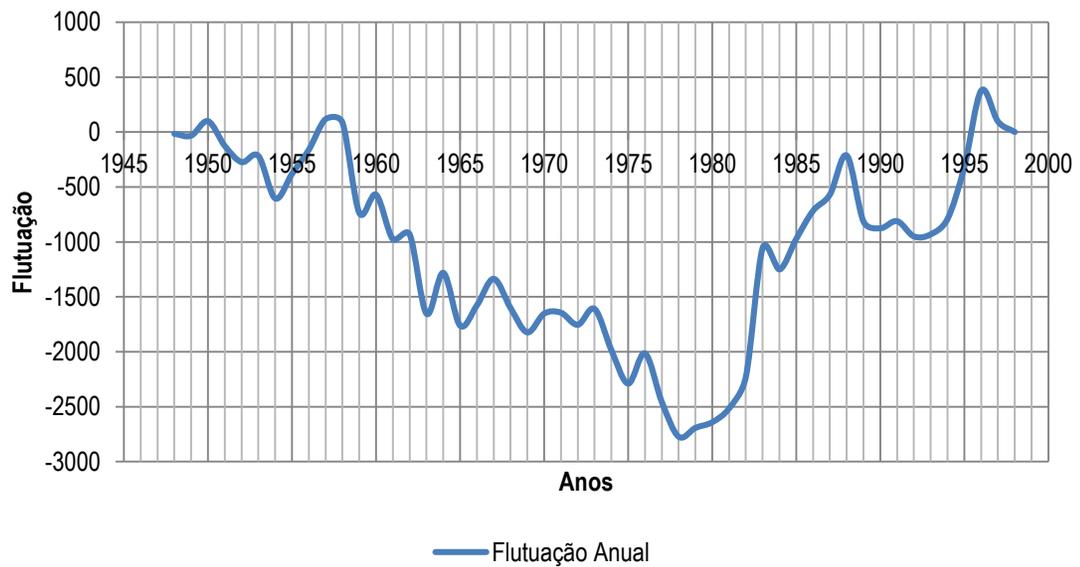
### Posto Pluviométrico 2145017



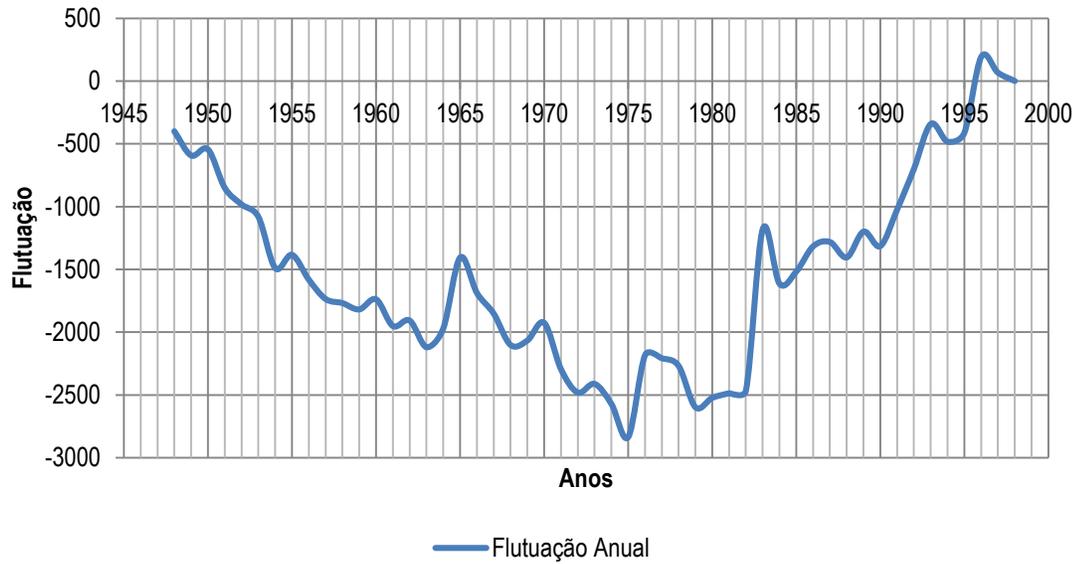
### Posto Pluviométrico 2244065



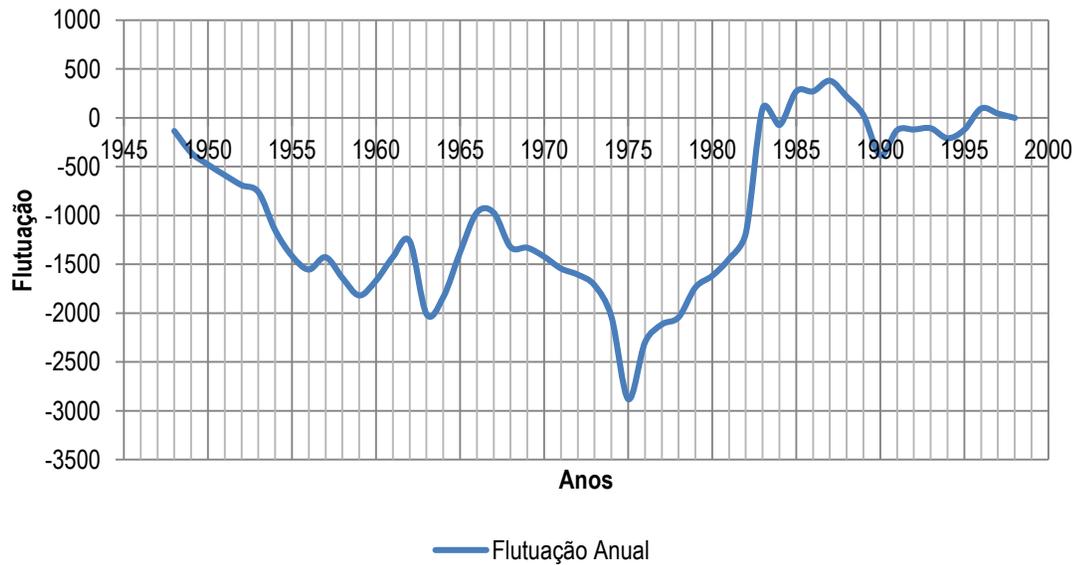
### Posto Pluviométrico 2245010



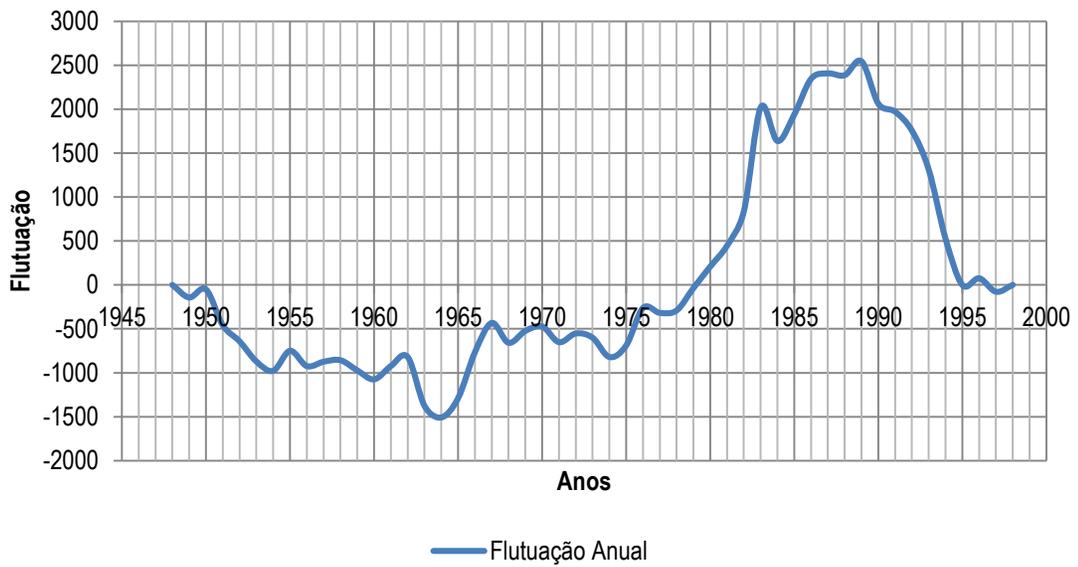
### Posto Pluviométrico 2245065



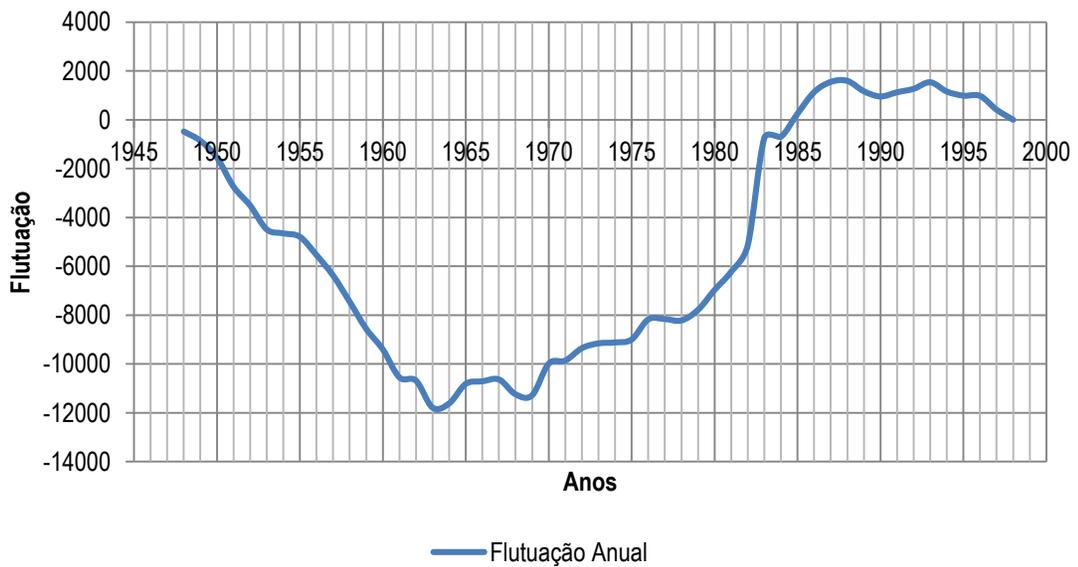
### Posto Pluviométrico 2245074



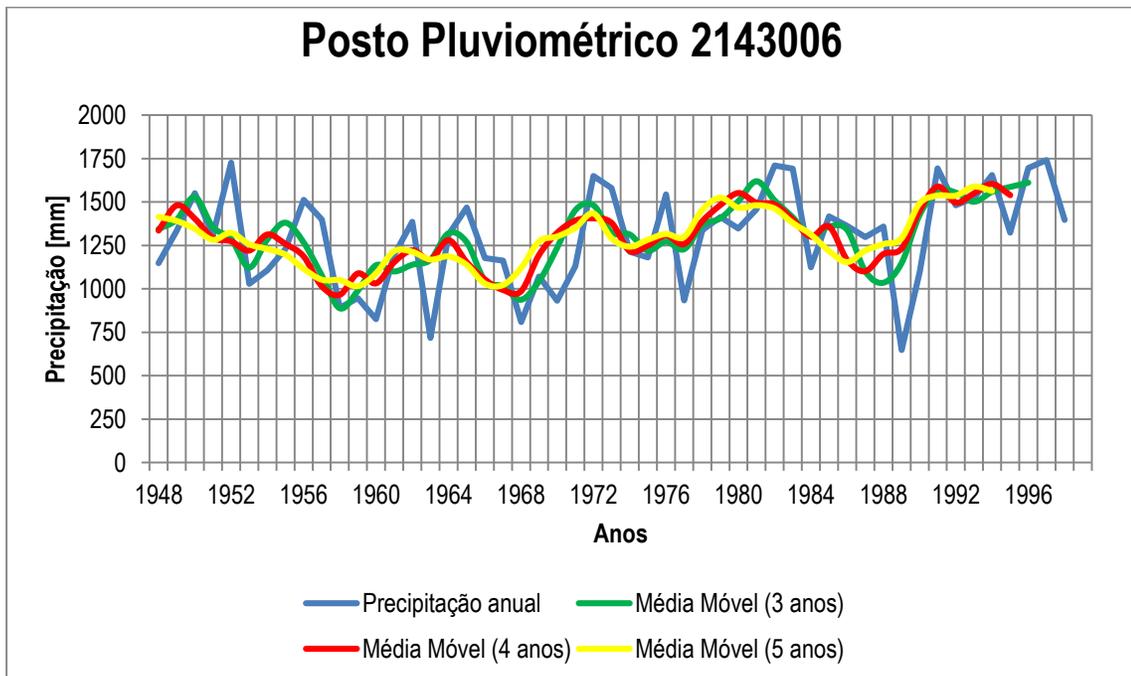
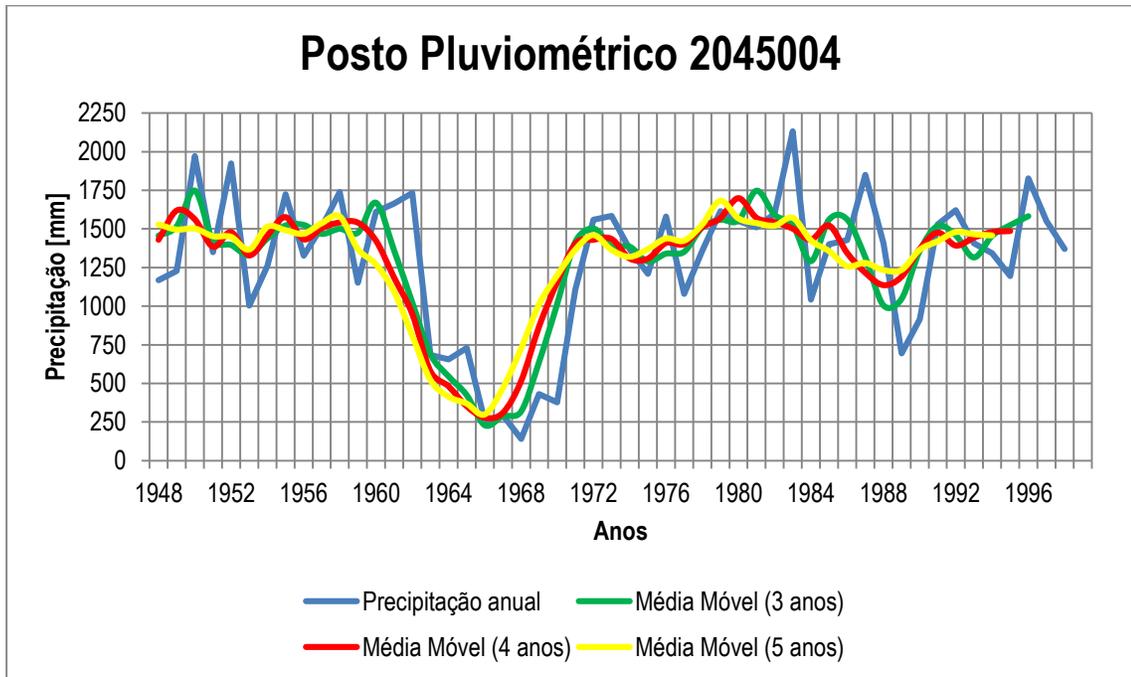
### Posto Pluviométrico 2245077



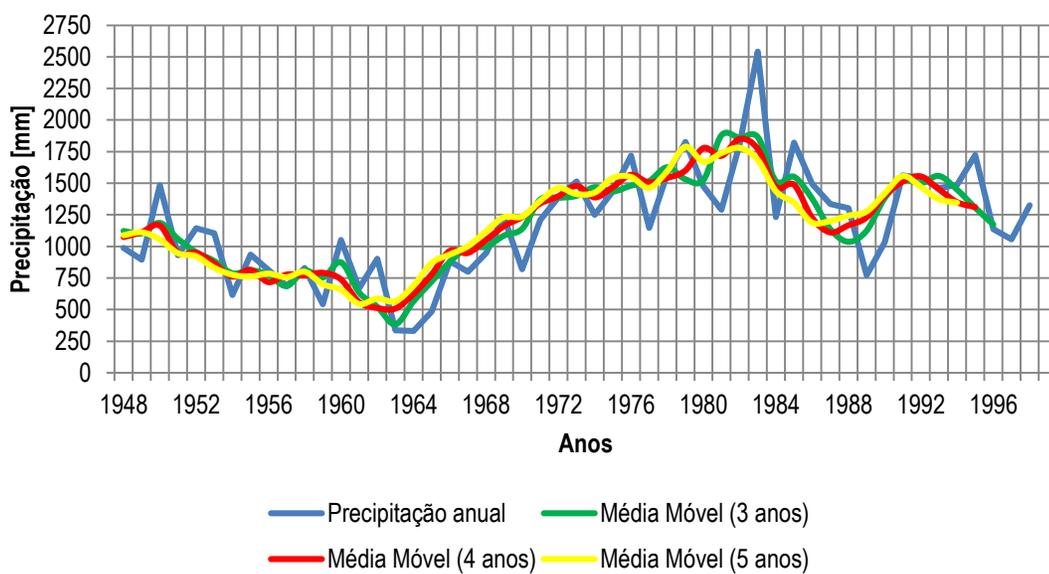
### Posto Pluviométrico 2245080



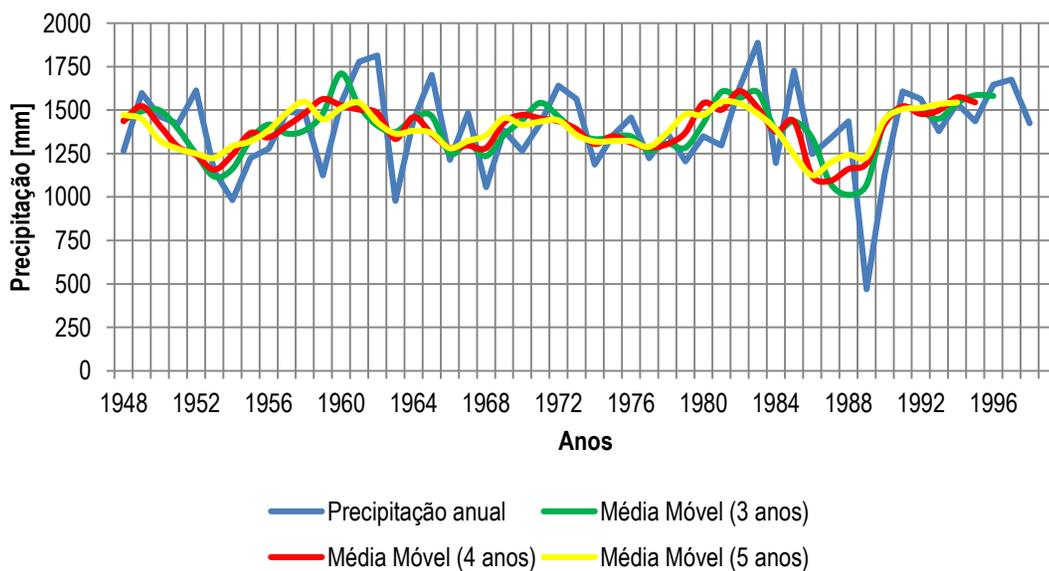
Apêndice B – Média Móvel



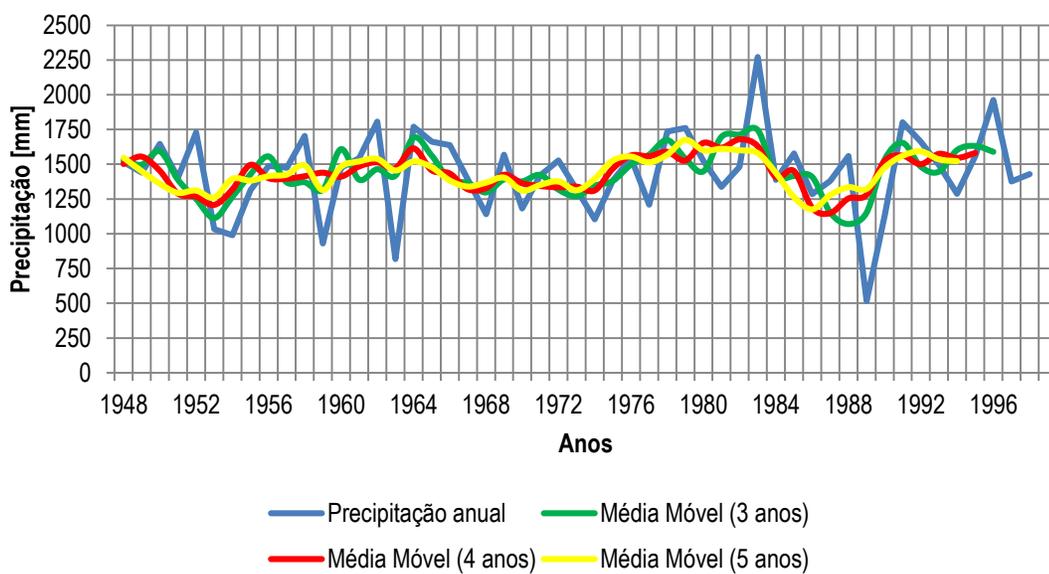
### Posto Pluviométrico 2143008



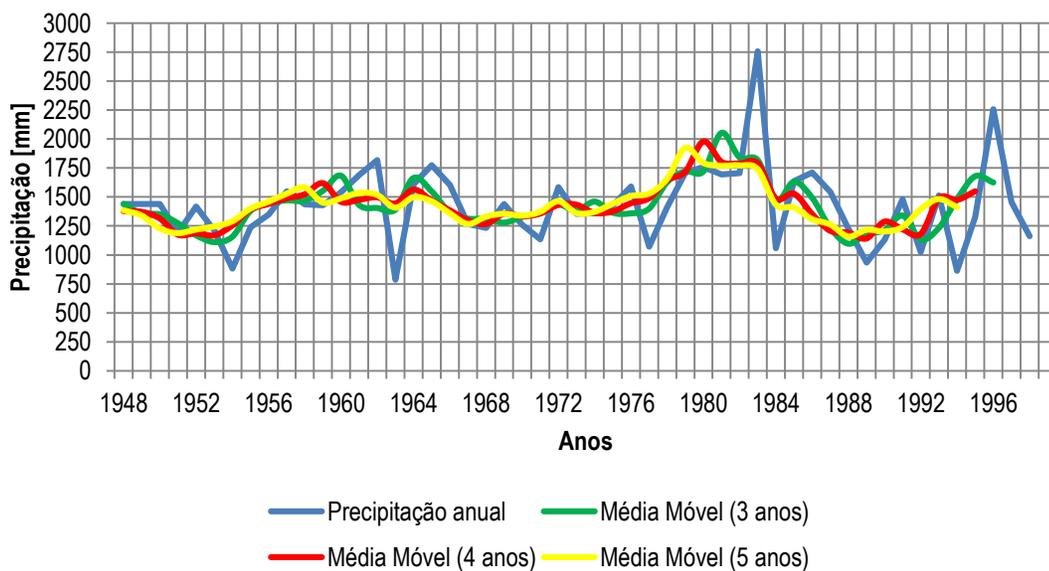
### Posto Pluviométrico 2143009



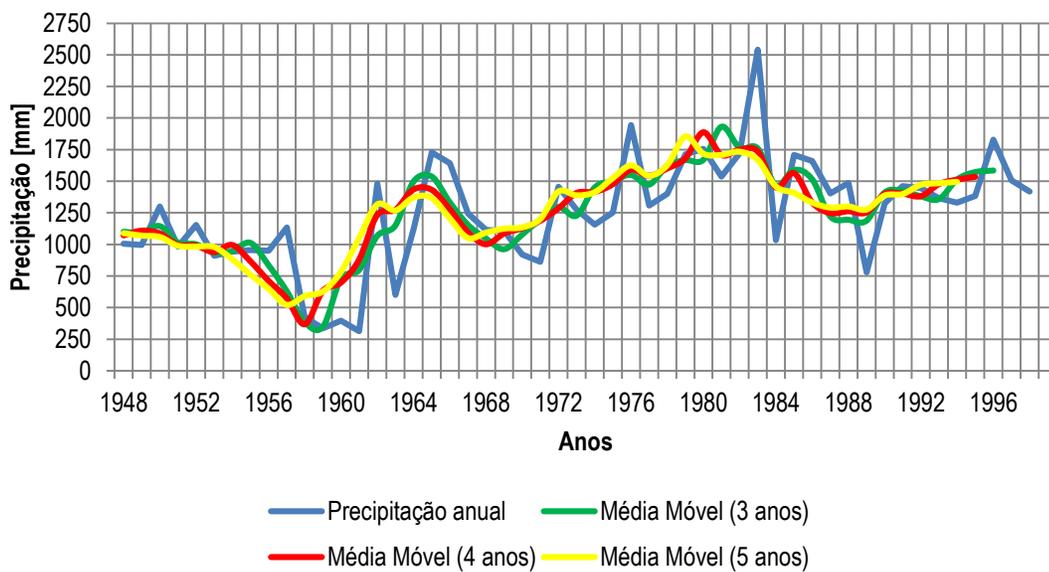
### Posto Pluviométrico 2144002



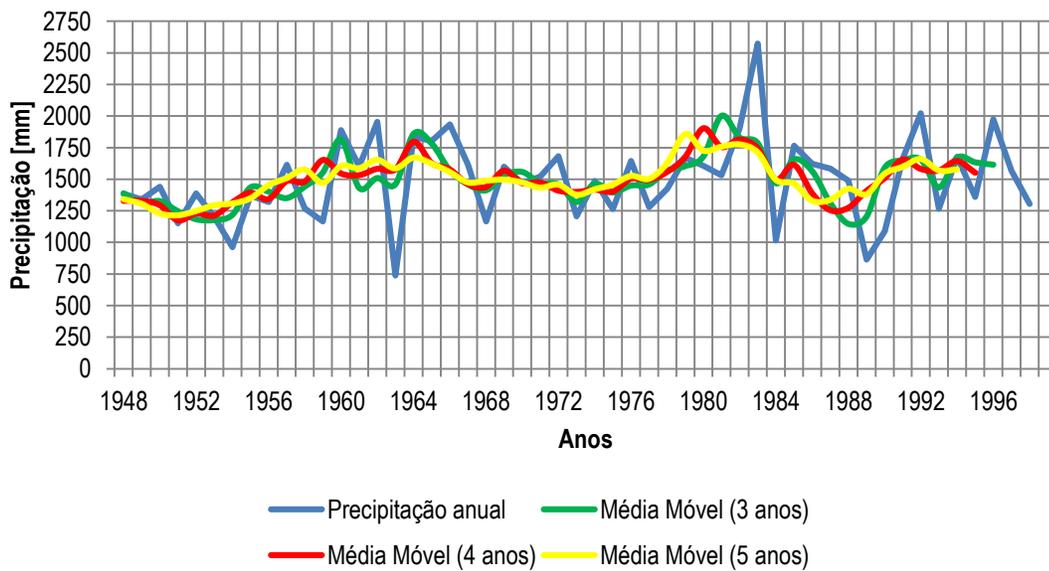
### Posto Pluviométrico 2144003



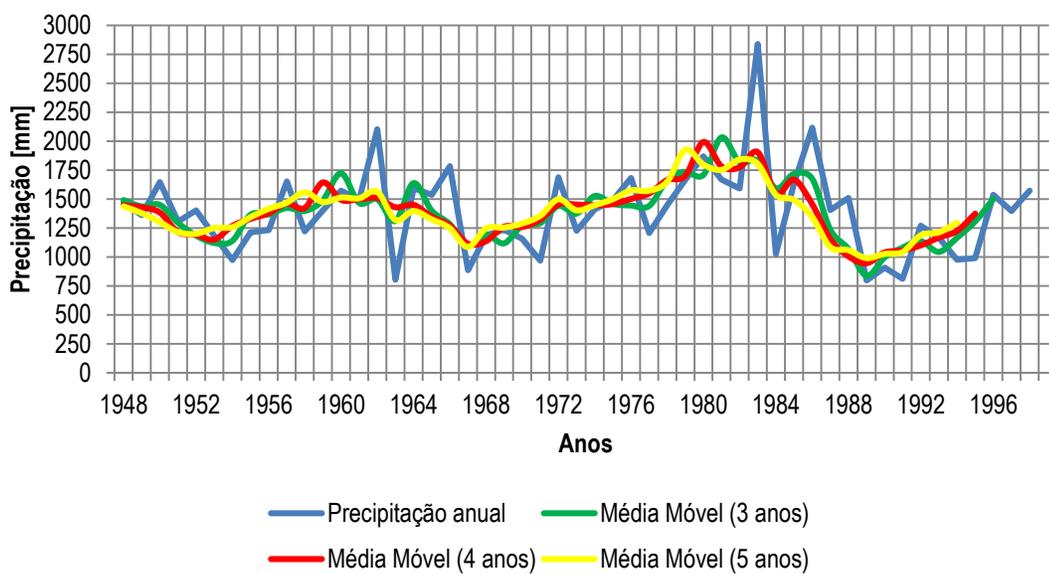
### Posto Pluviométrico 2144004



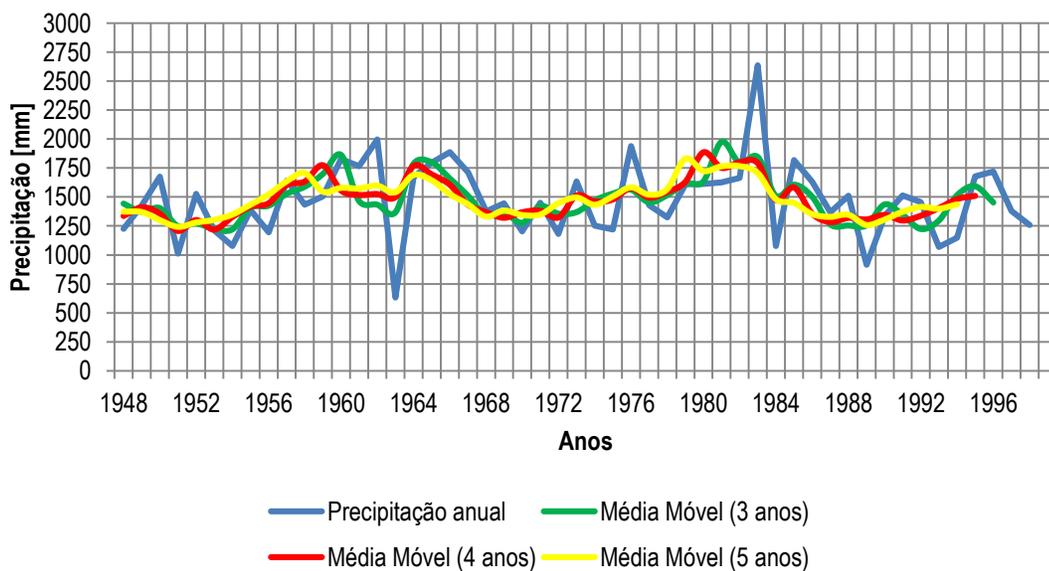
### Posto Pluviométrico 2144005



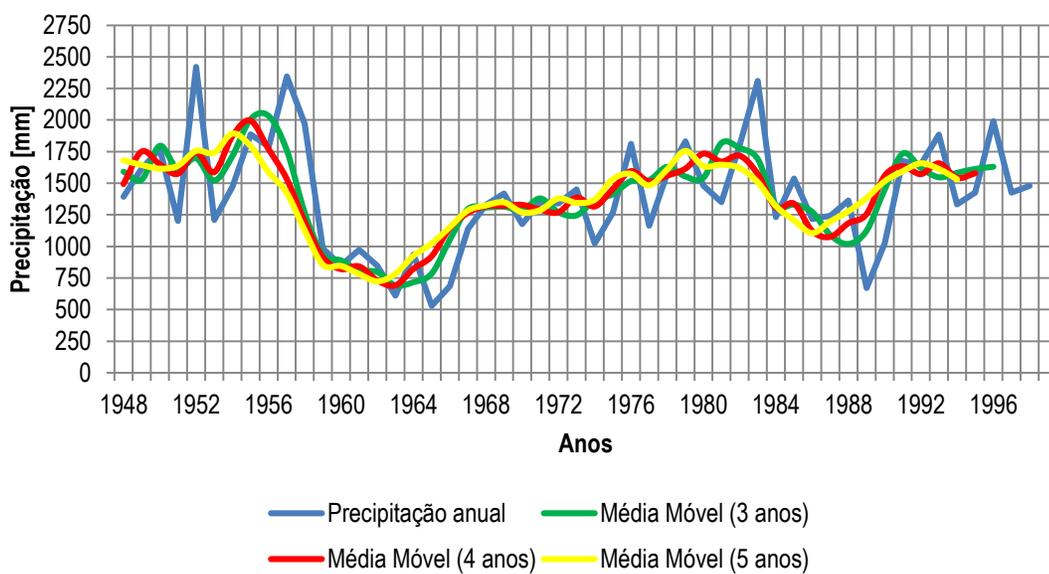
### Posto Pluviométrico 2144006



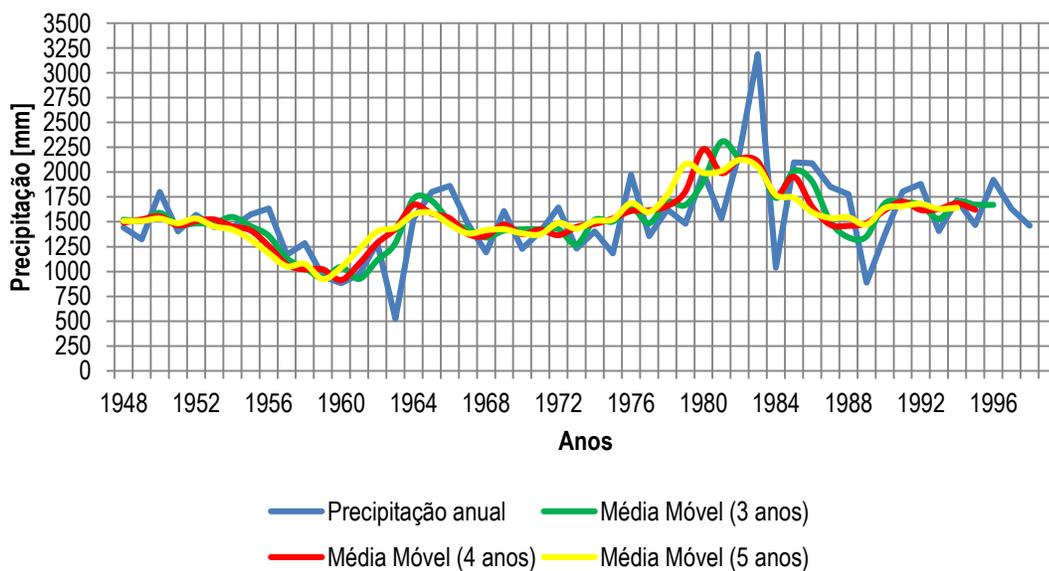
### Posto Pluviométrico 2144007



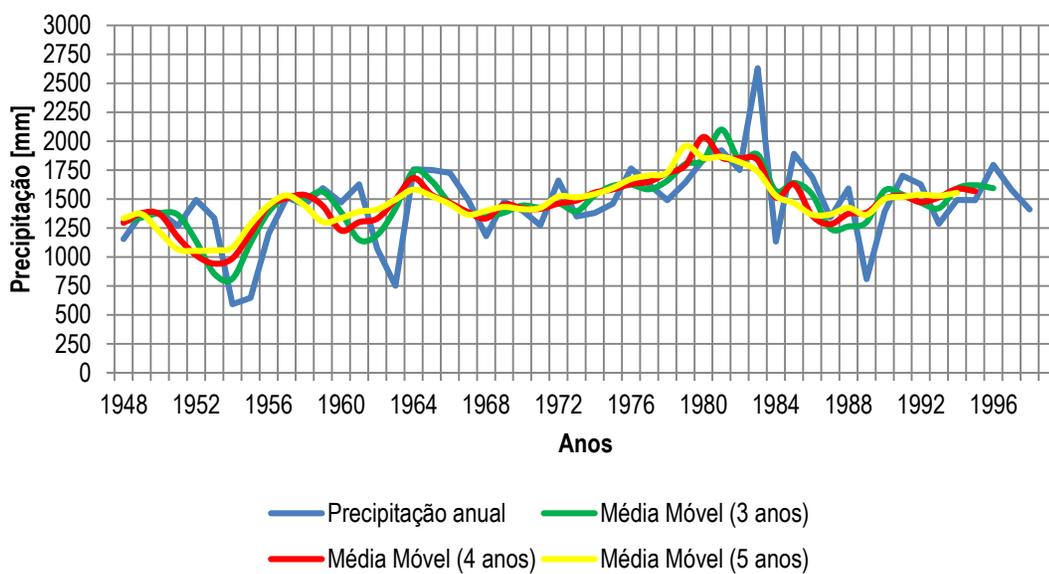
### Posto Pluviométrico 2144009



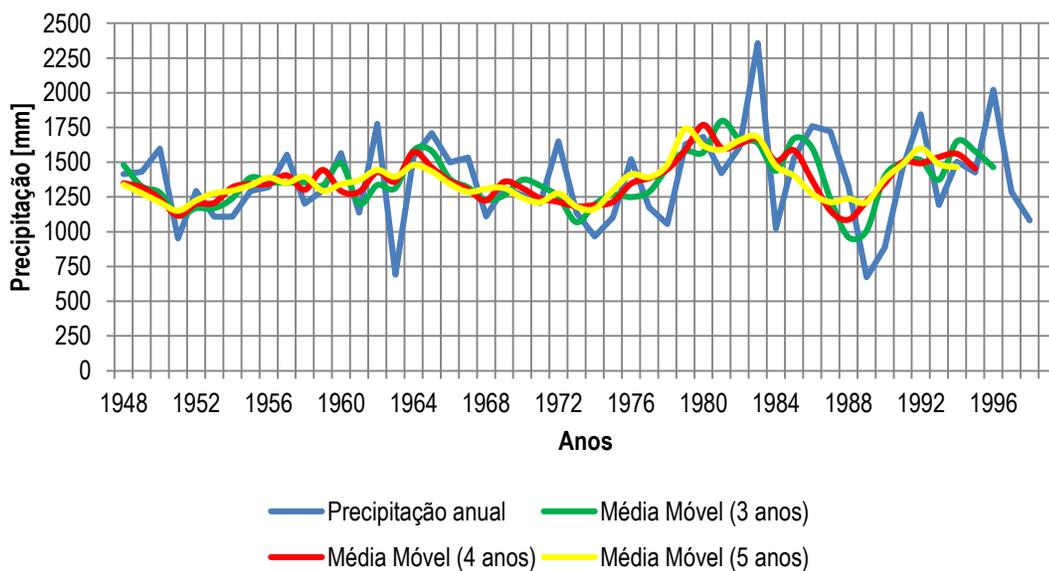
### Posto Pluviométrico 2144018



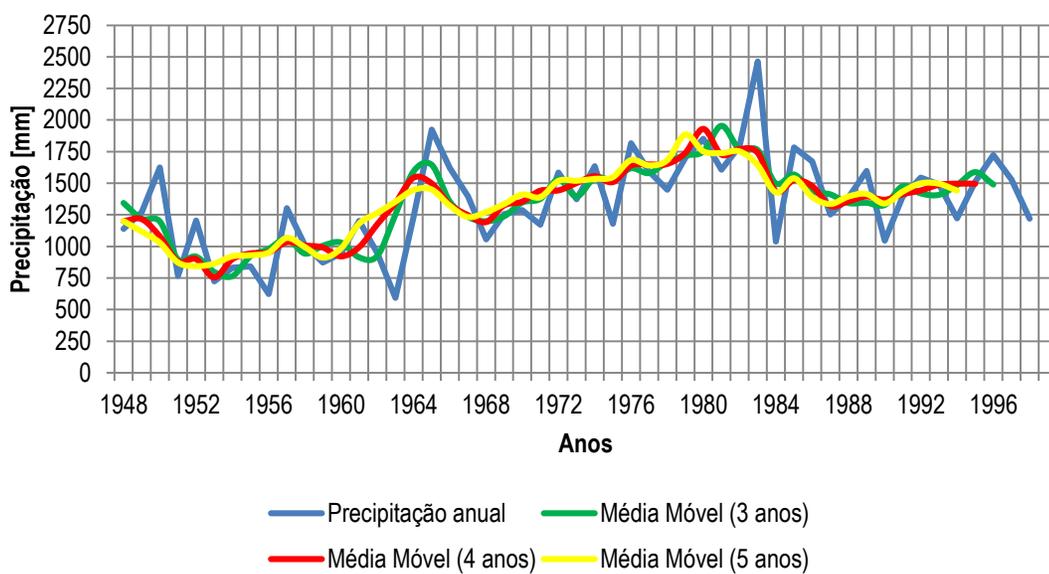
### Posto Pluviométrico 2145001



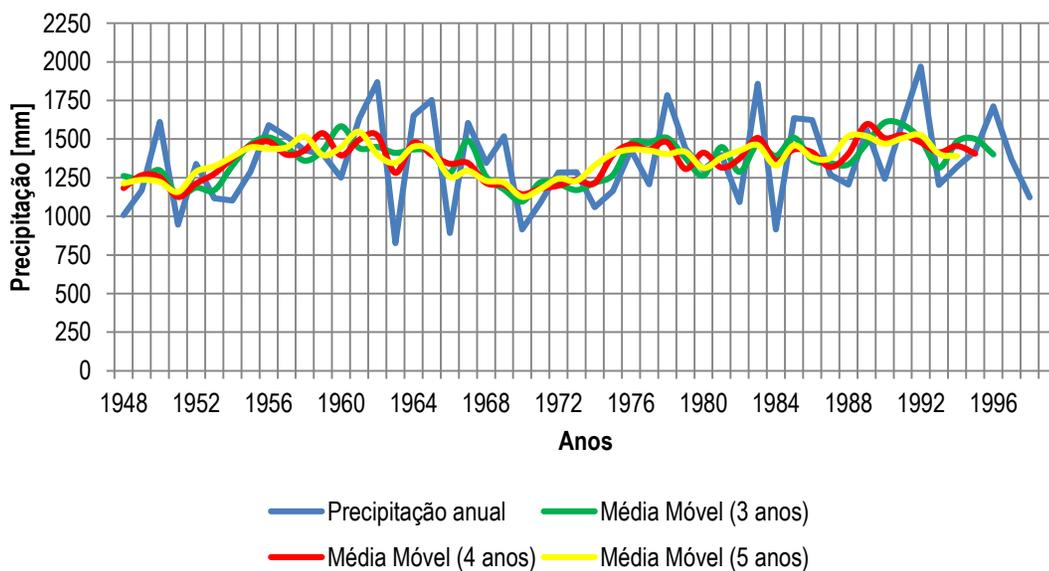
### Posto Pluviométrico 2145007



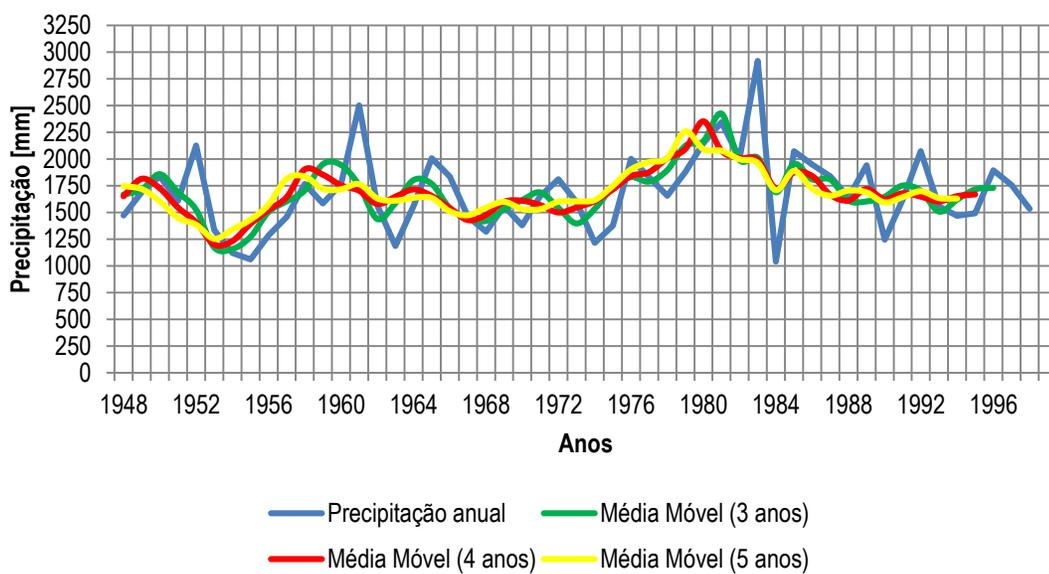
### Posto Pluviométrico 2145009



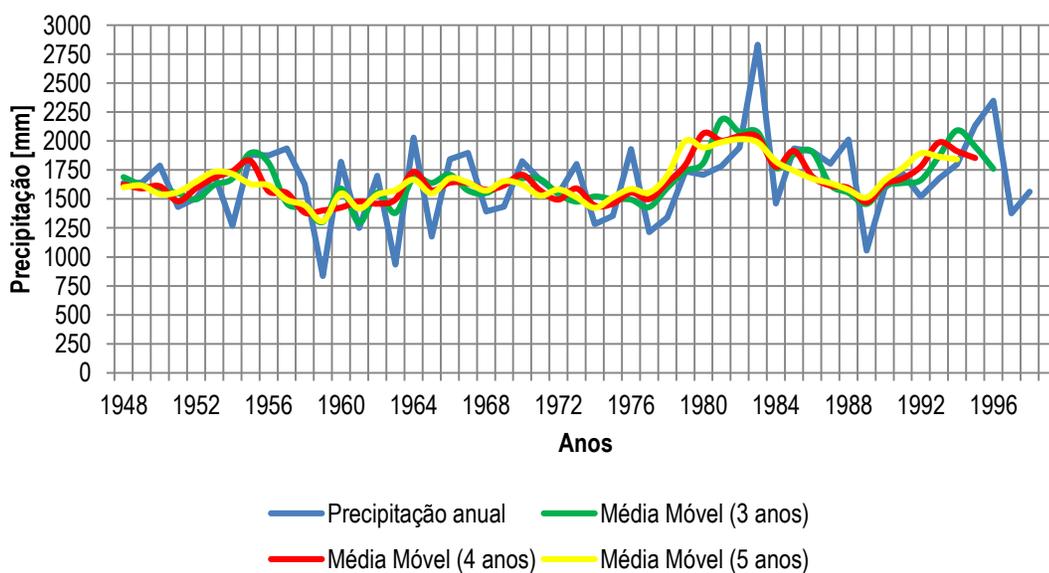
### Posto Pluviométrico 2145017



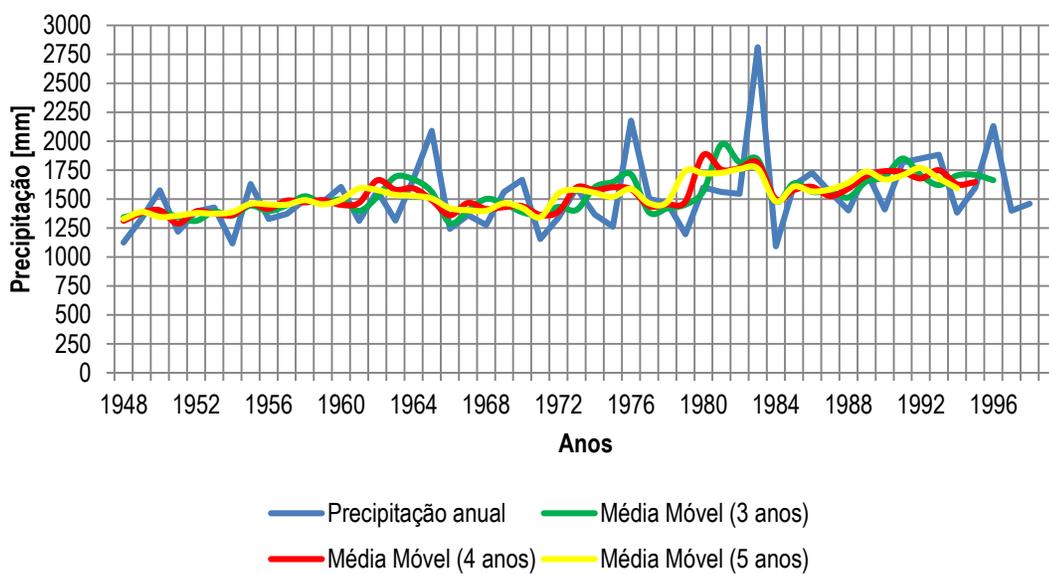
### Posto Pluviométrico 2244065



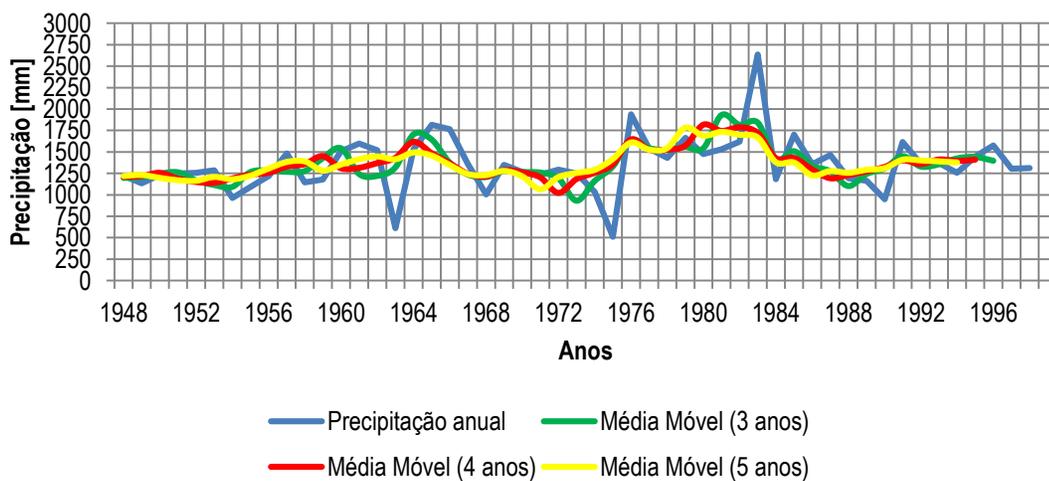
### Posto Pluviométrico 2245010



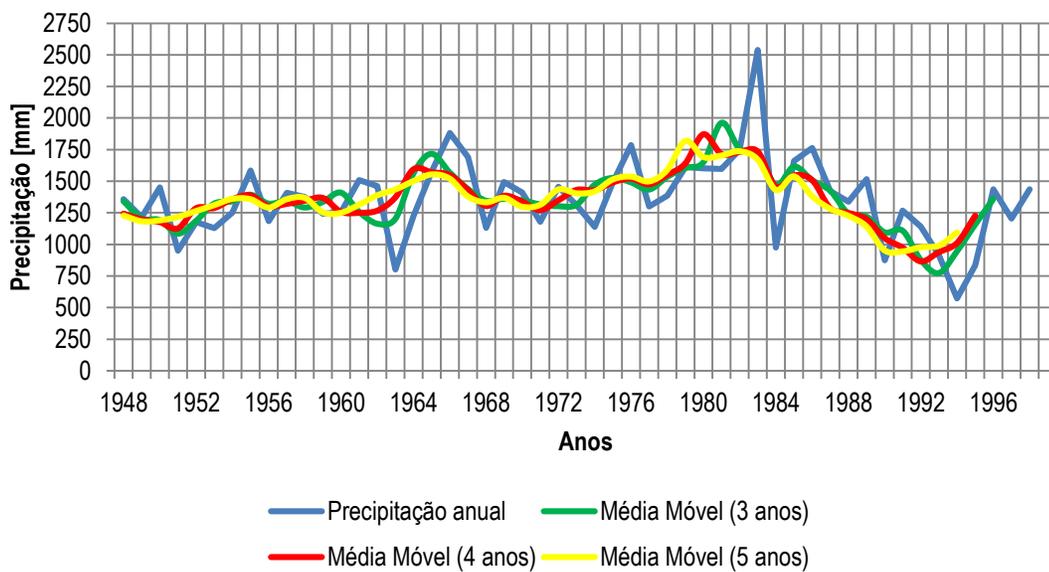
### Posto Pluviométrico 2245065



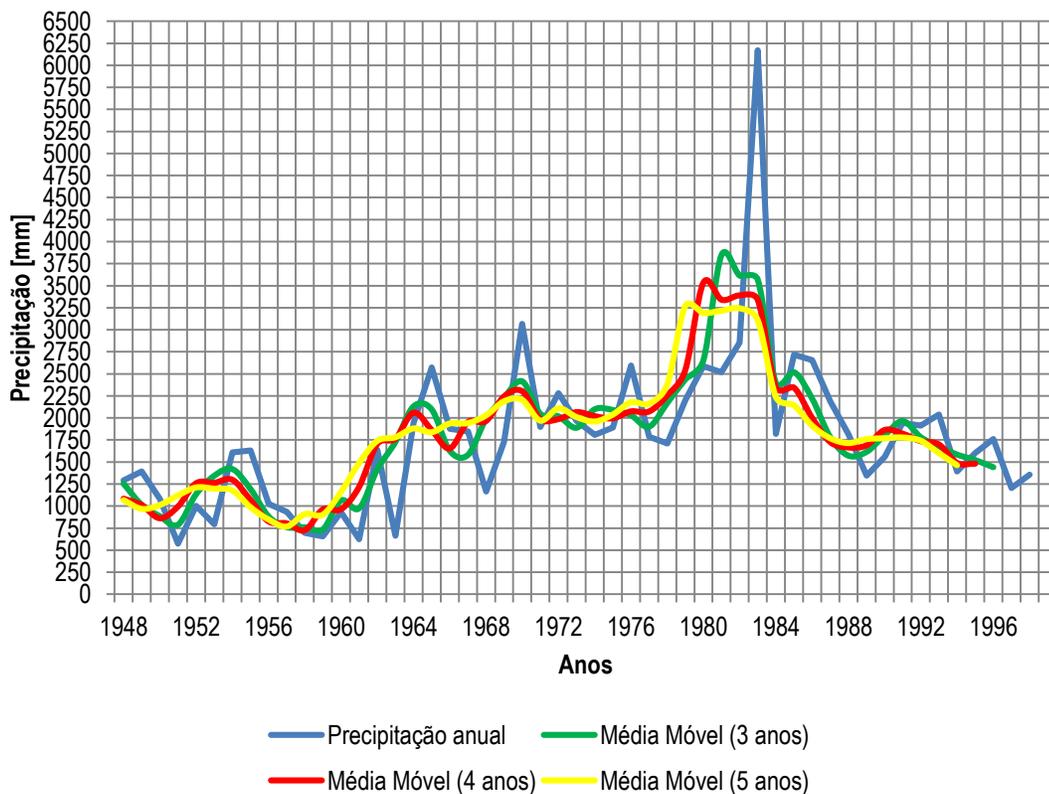
### Posto Pluviométrico 2245074



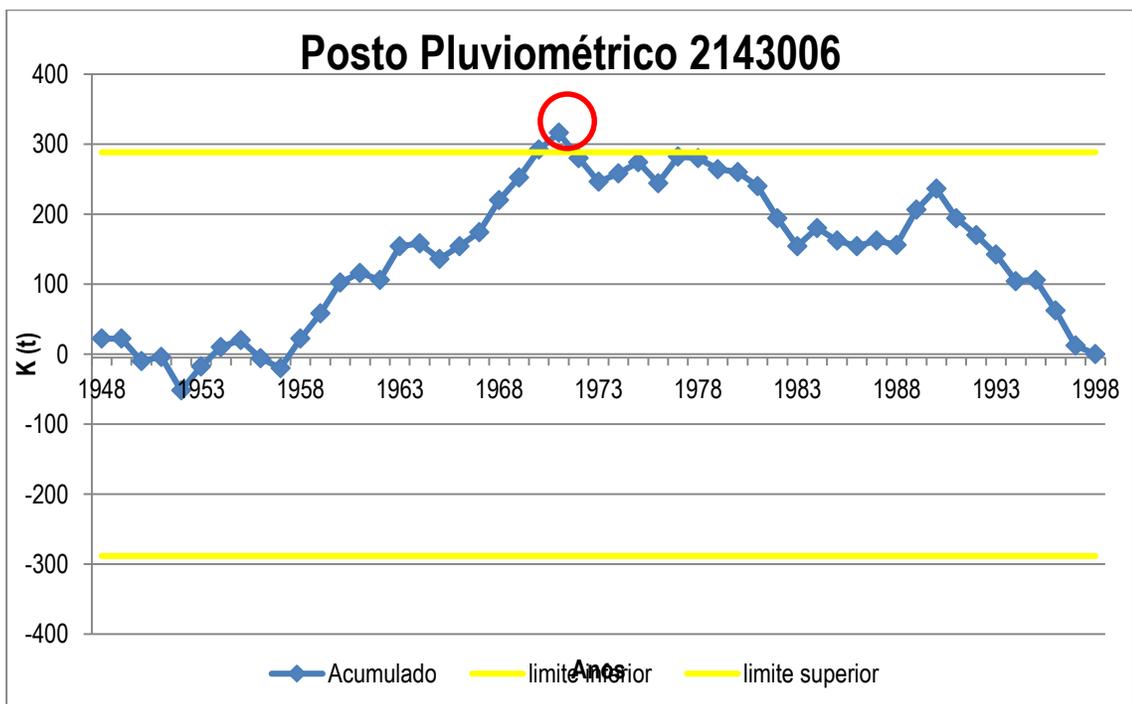
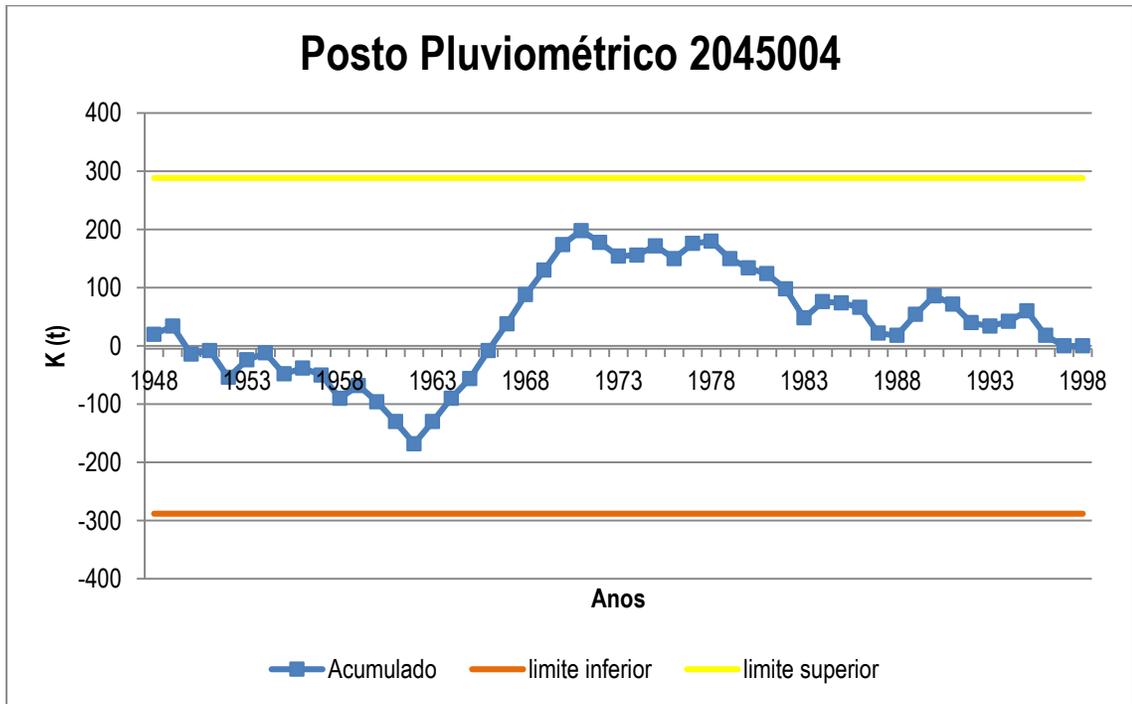
### Posto Pluviométrico 2245077

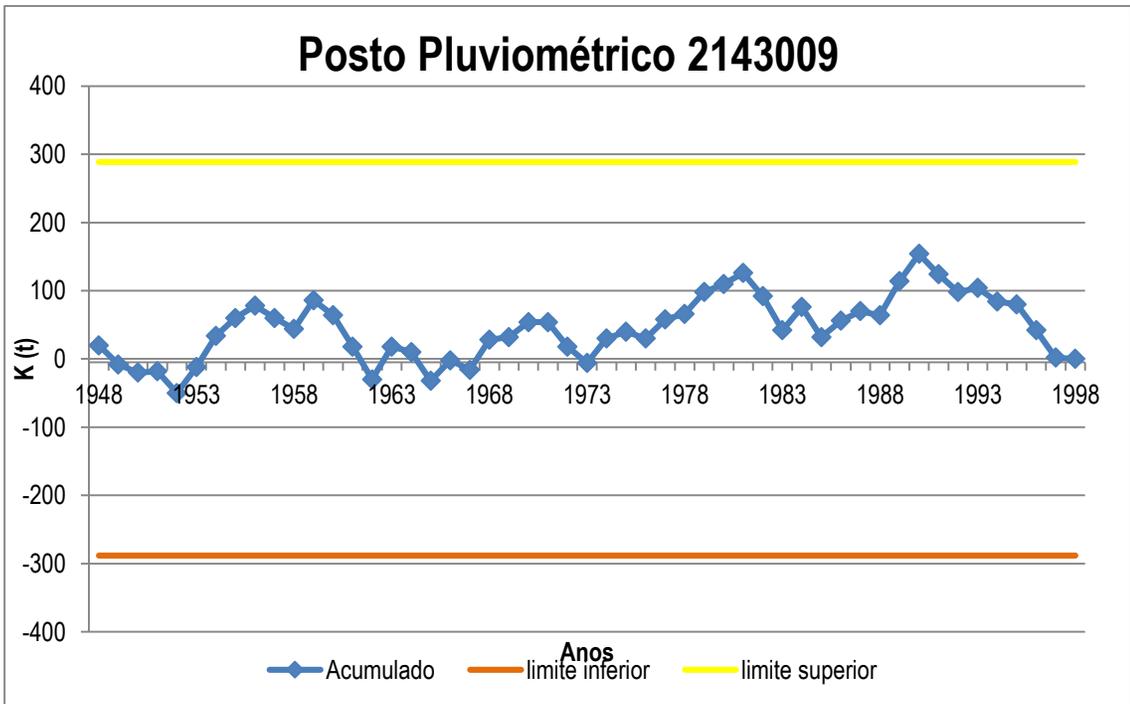
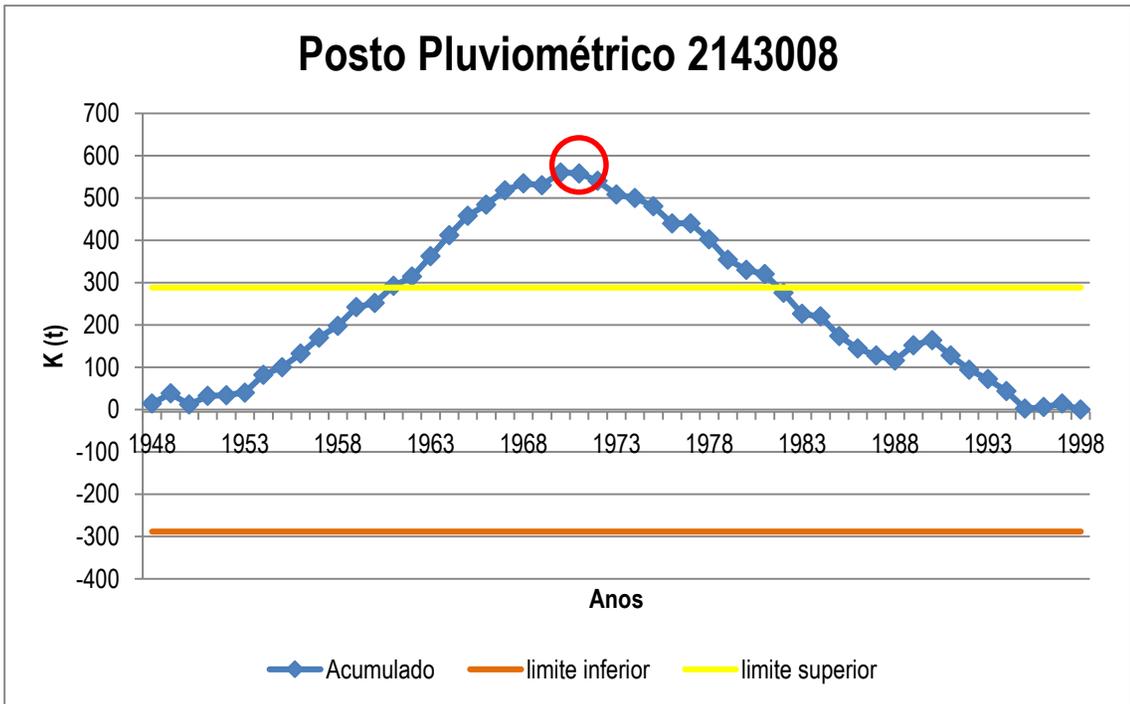


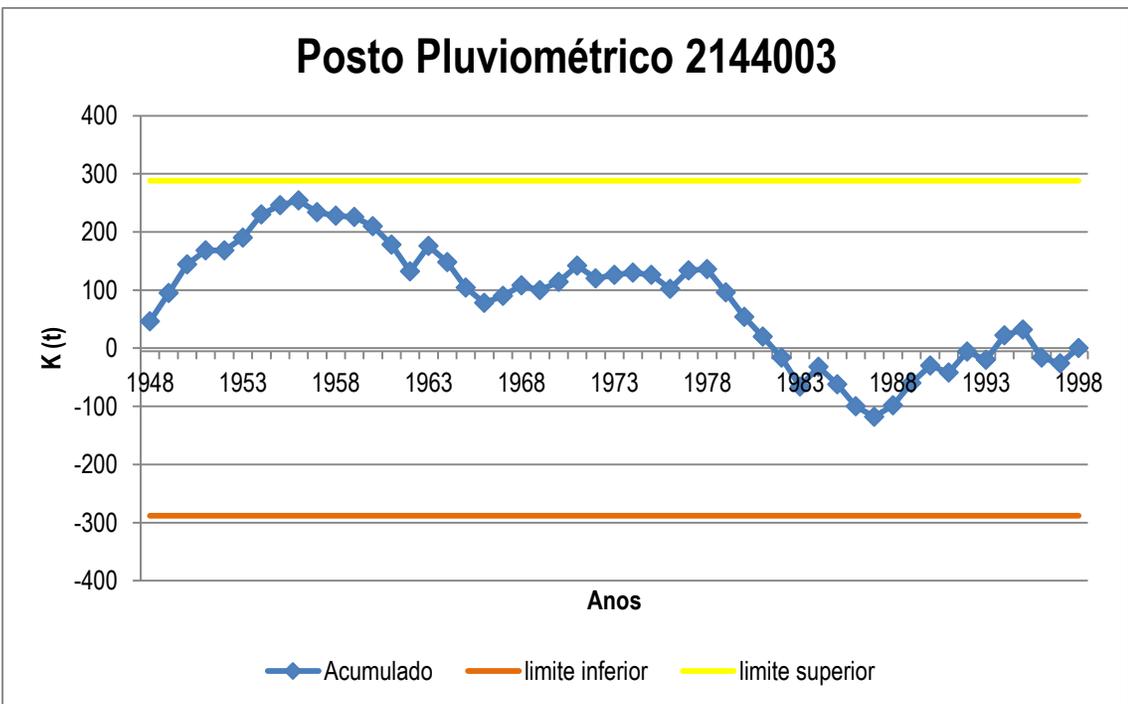
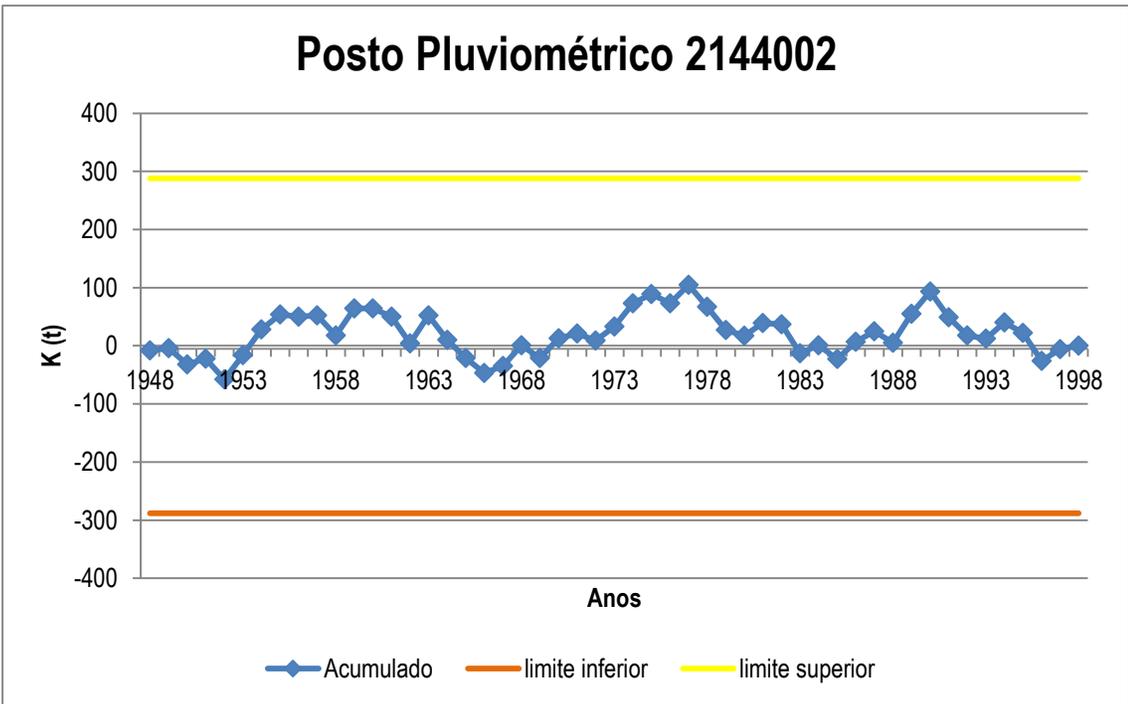
### Posto Pluviométrico 2245080

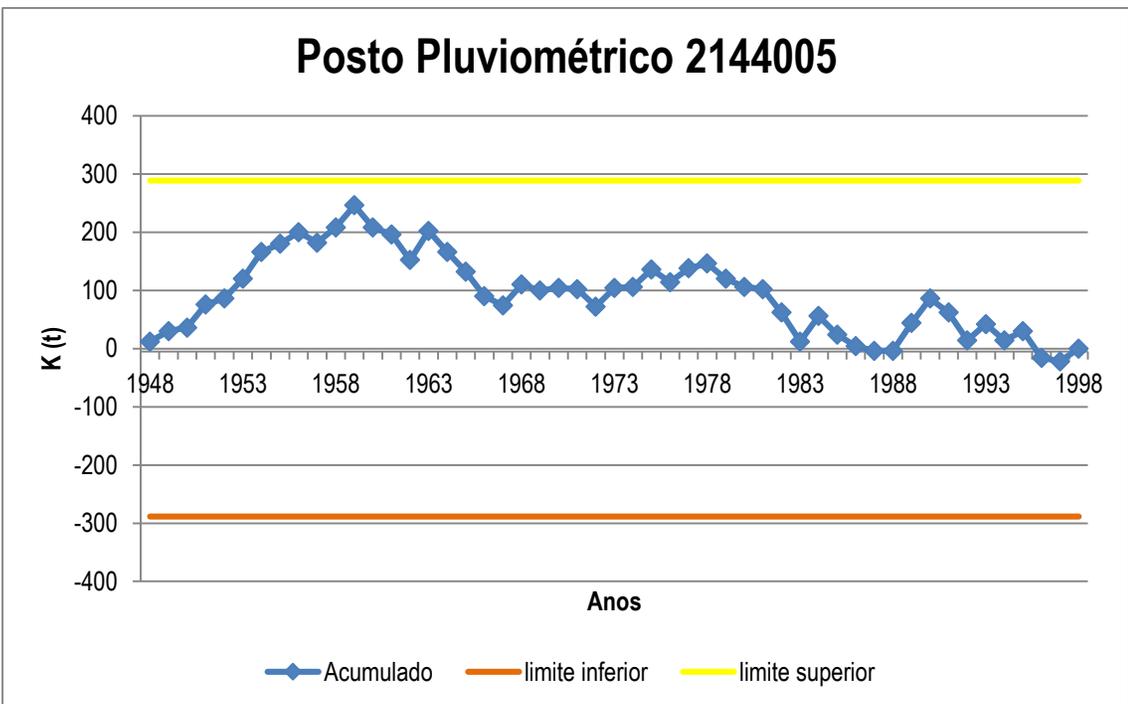
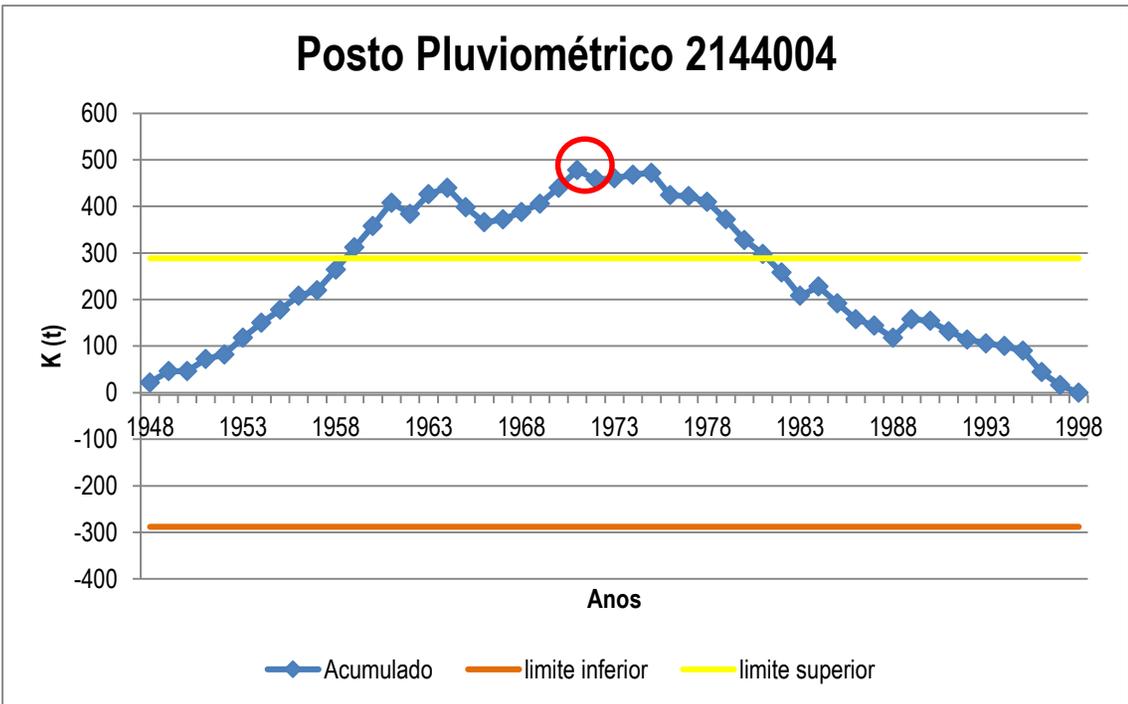


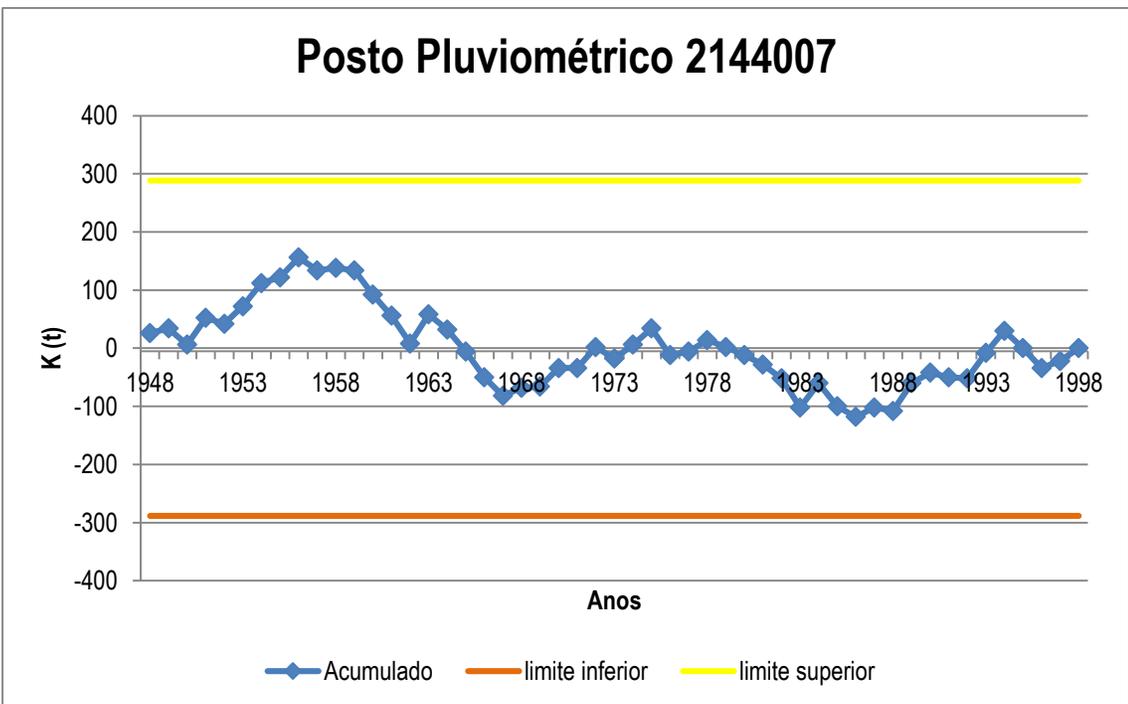
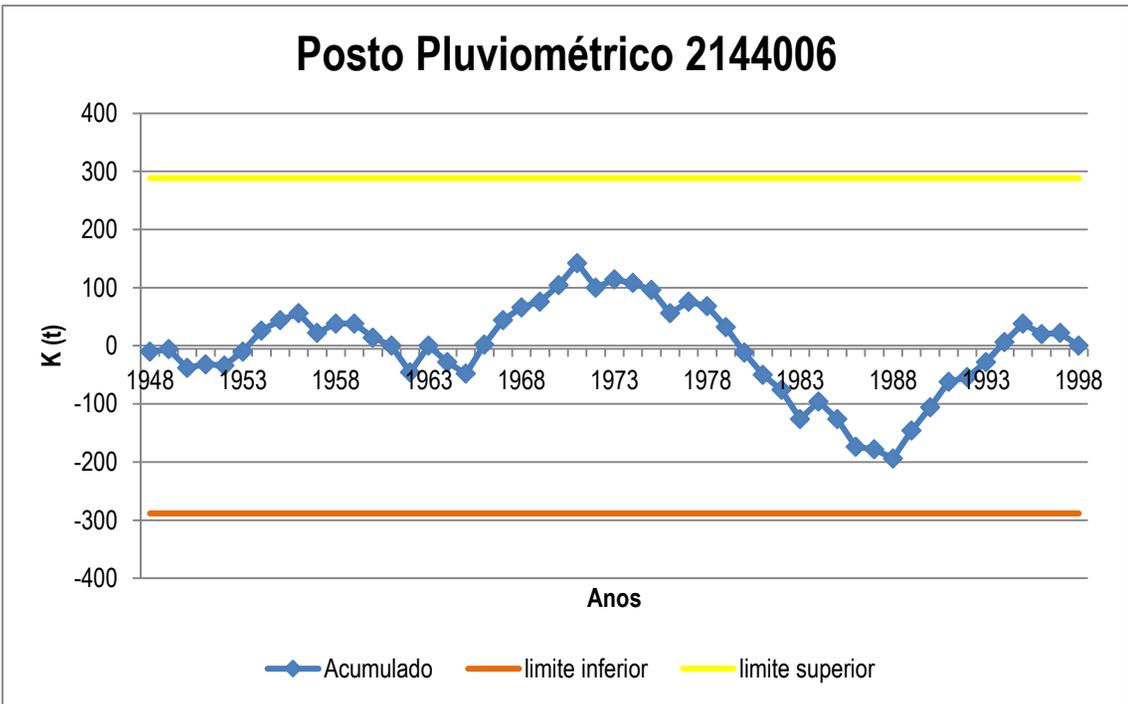
Apêndice C – Pettitt

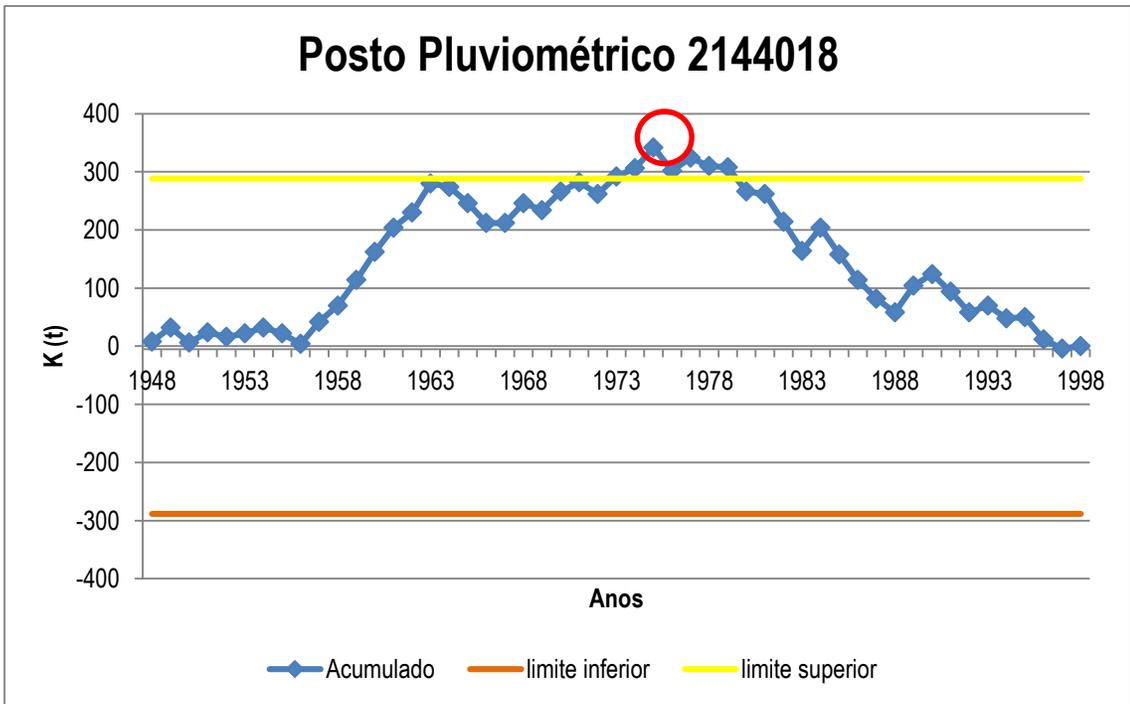
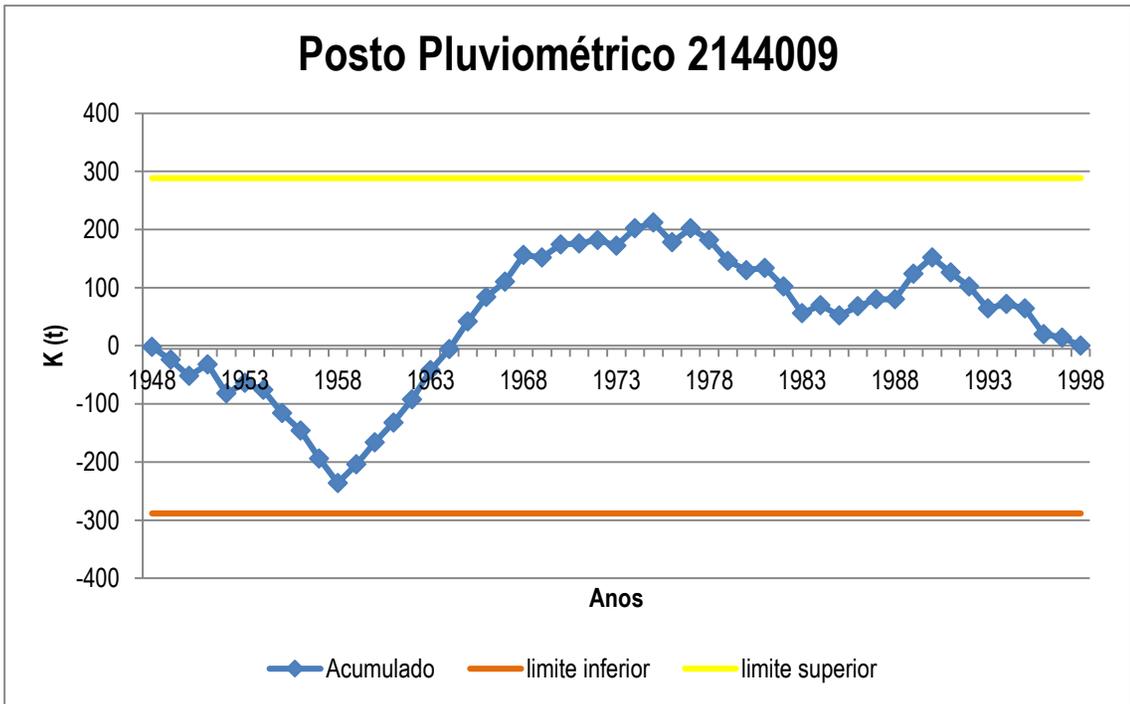


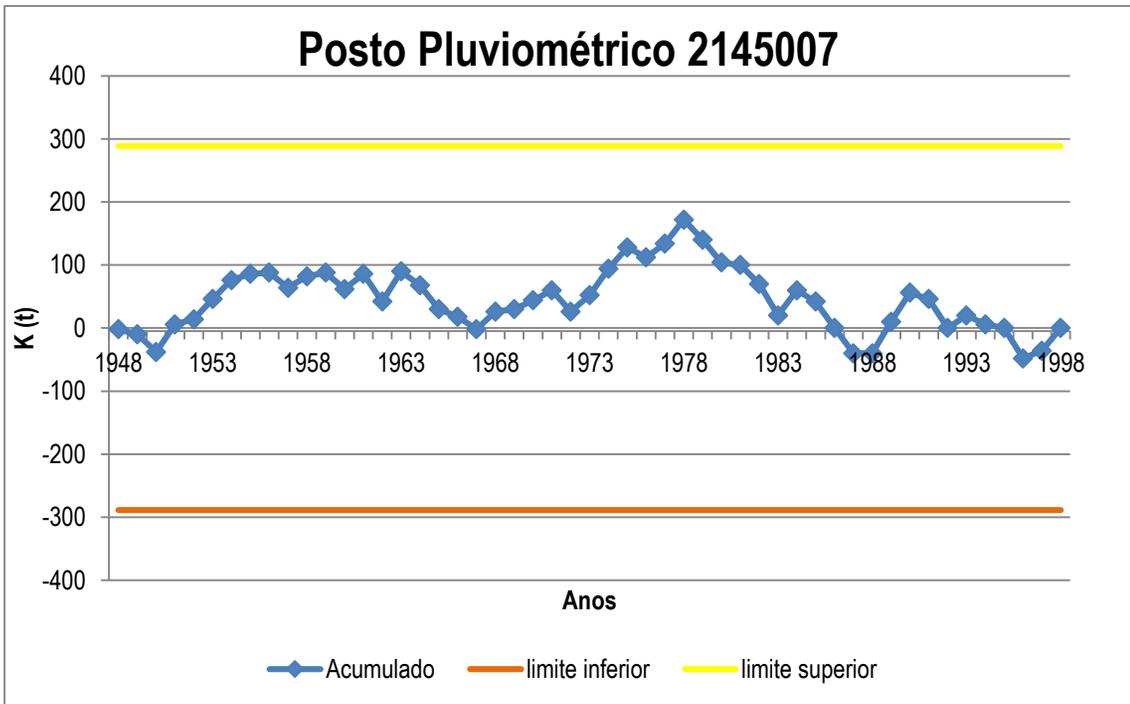
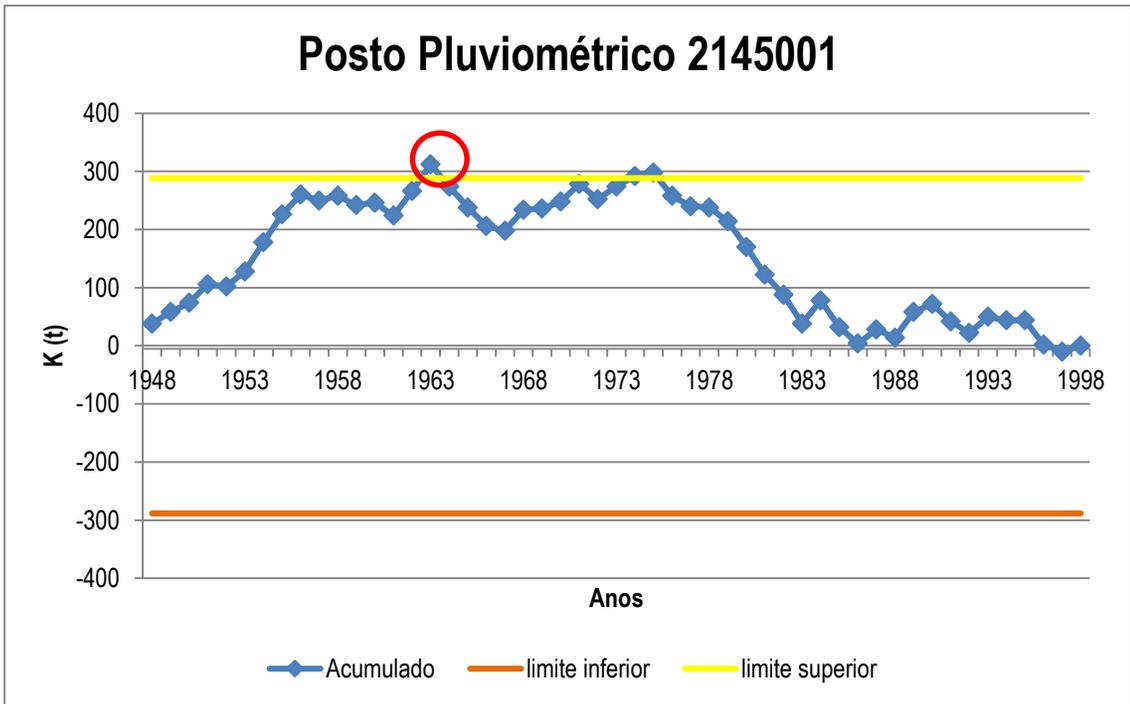


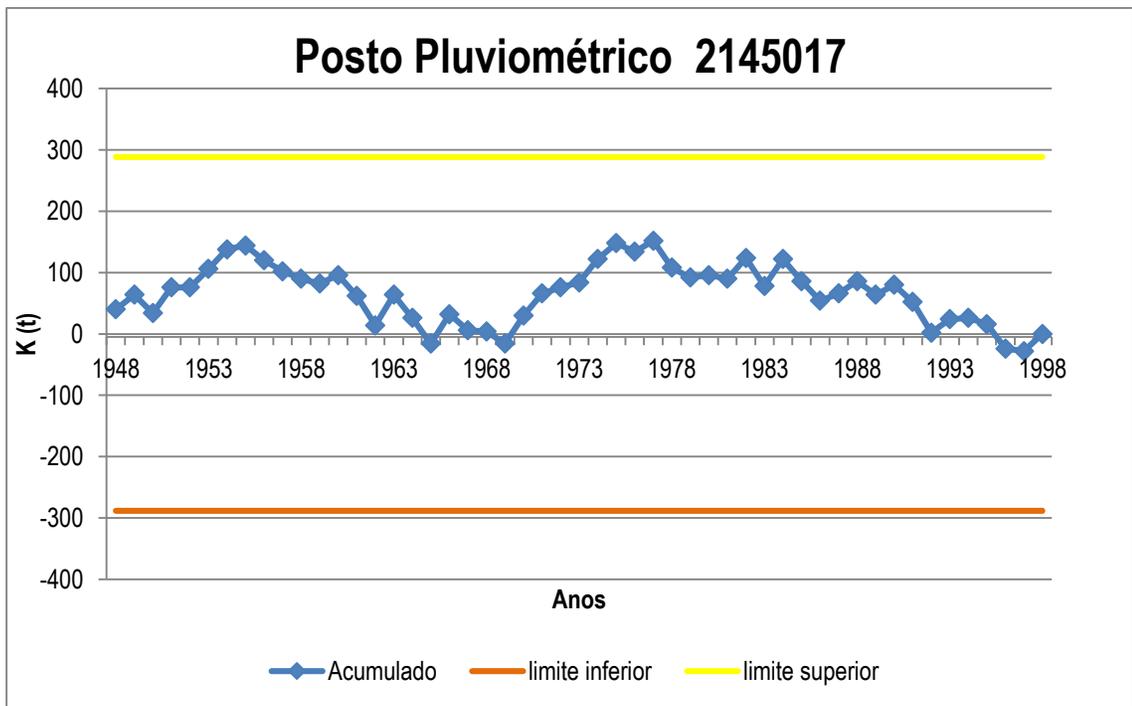
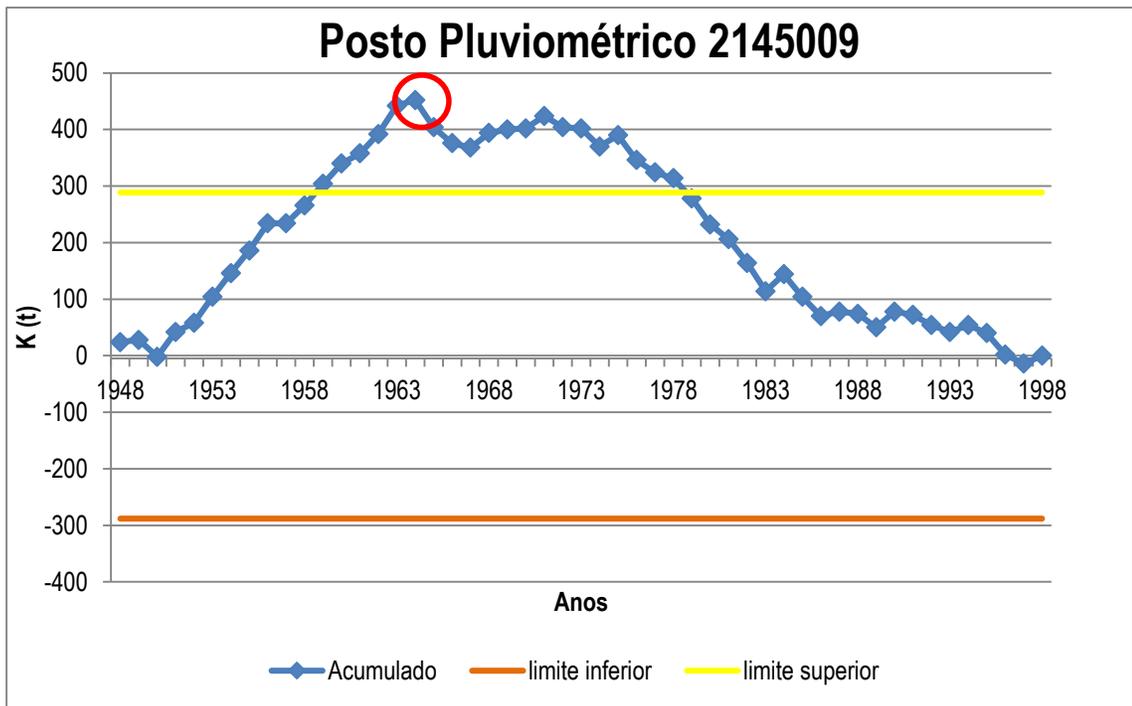


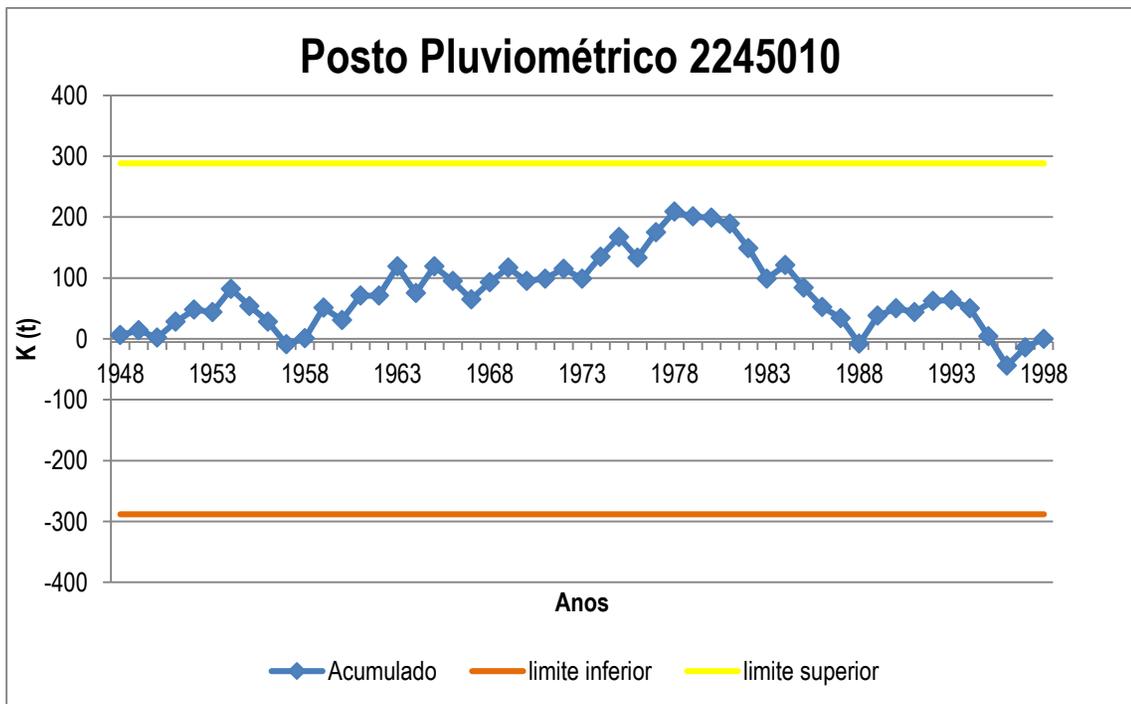
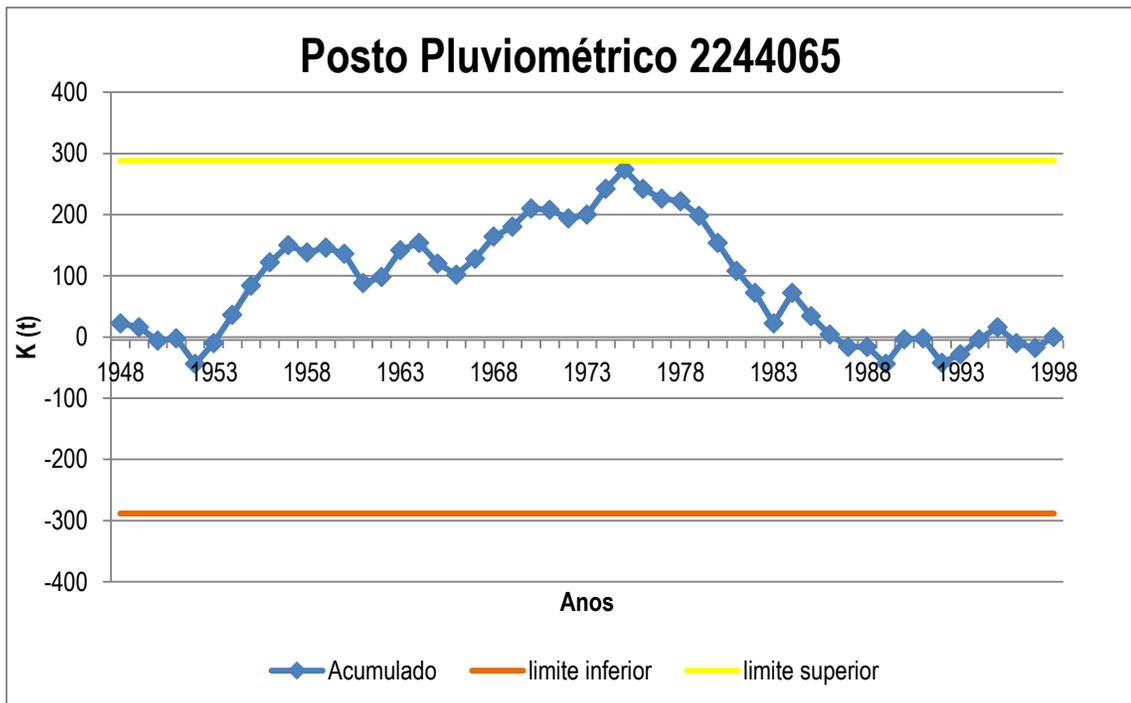


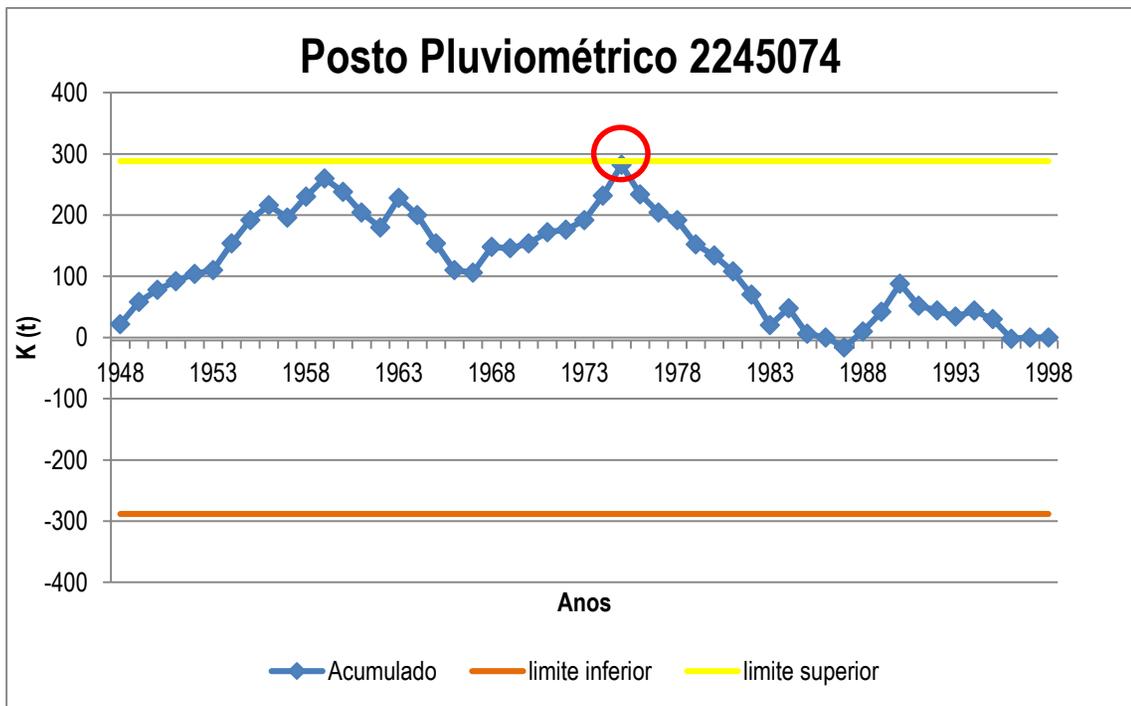
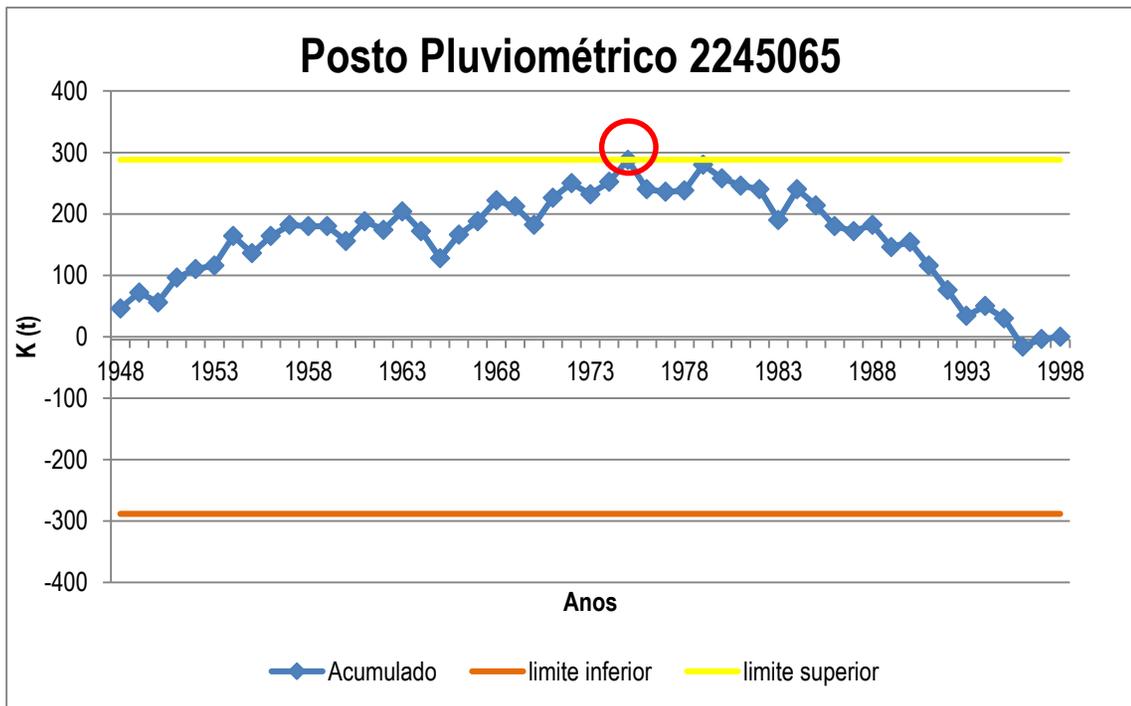


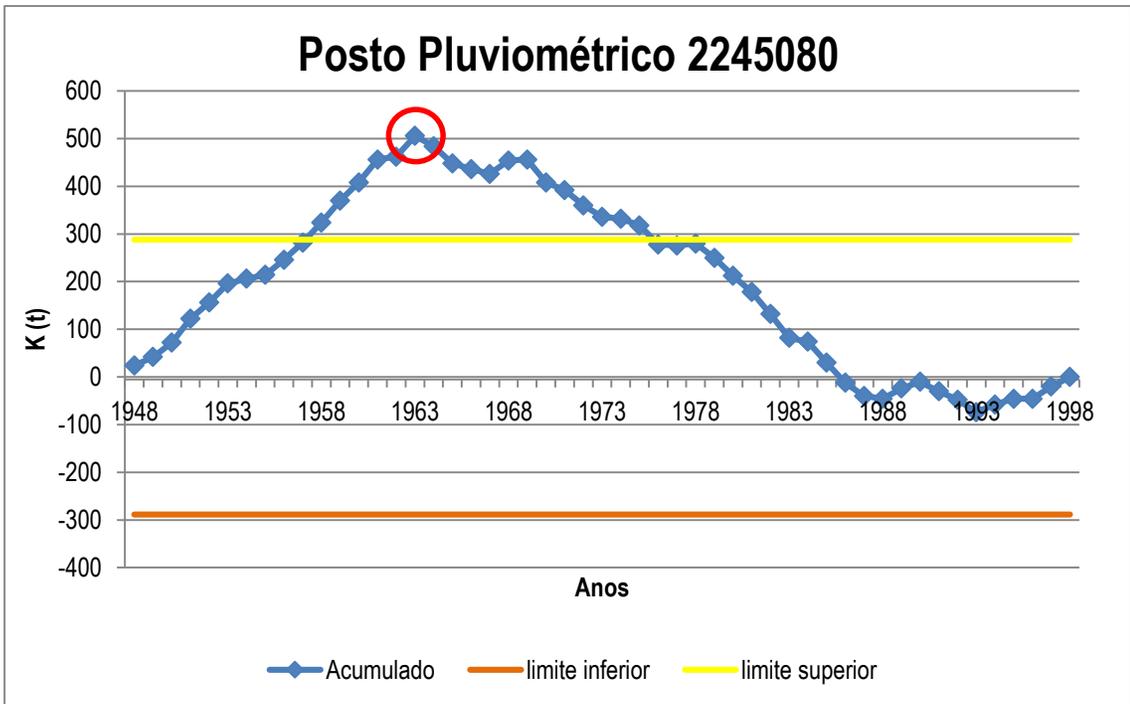
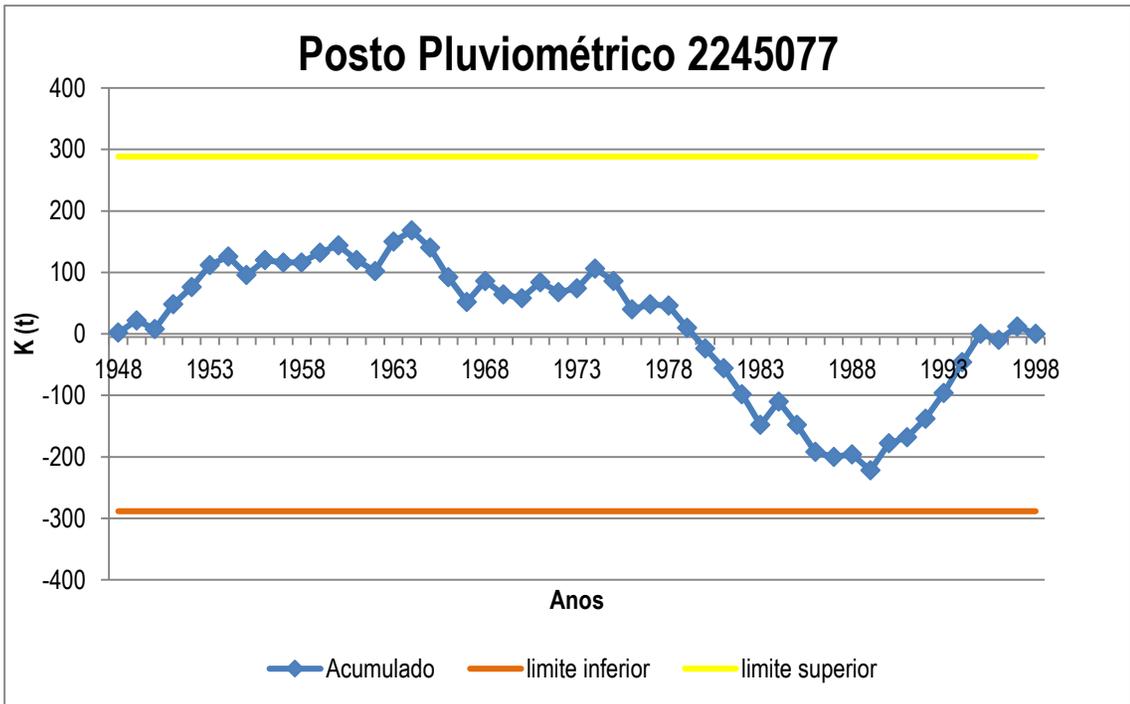




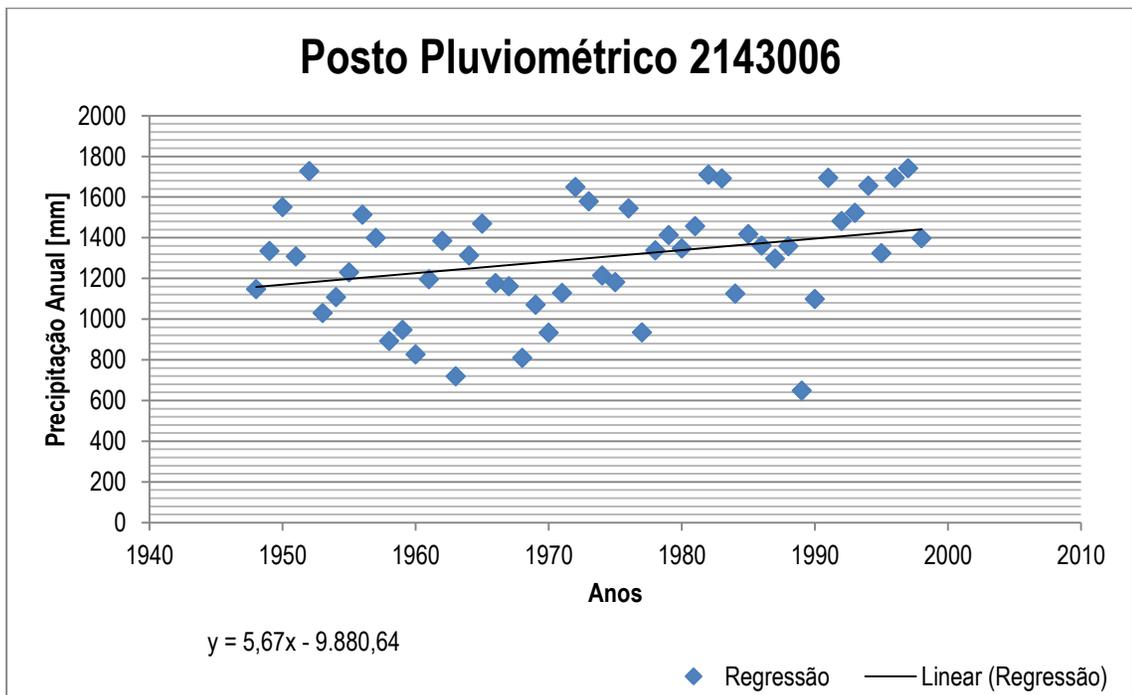
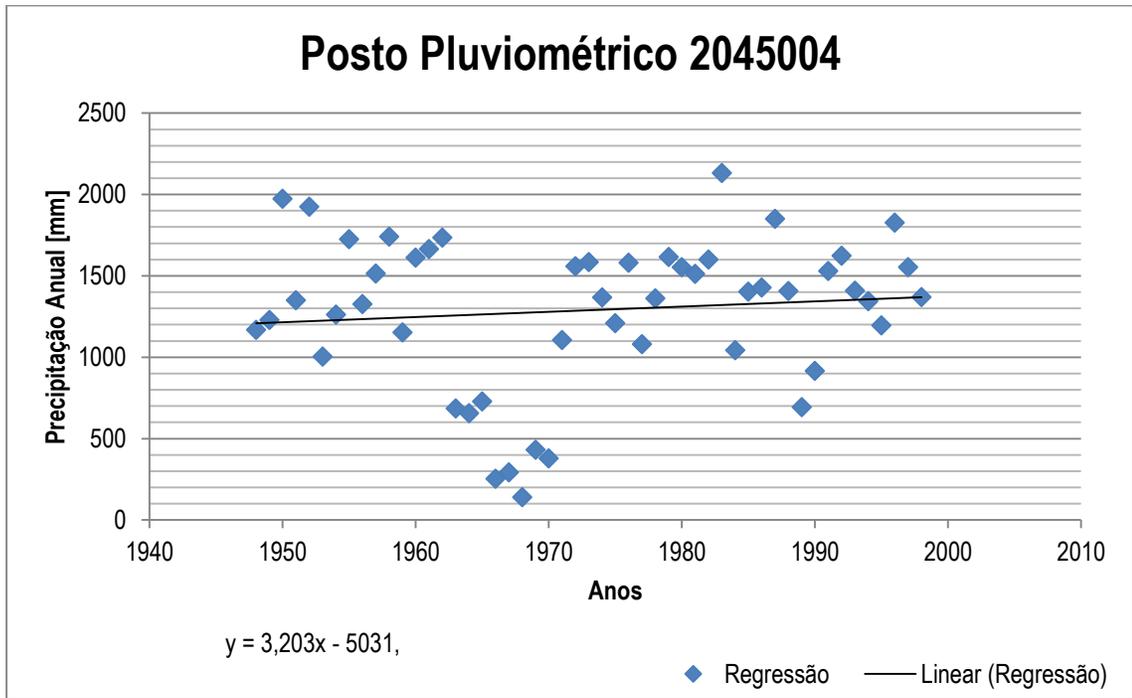


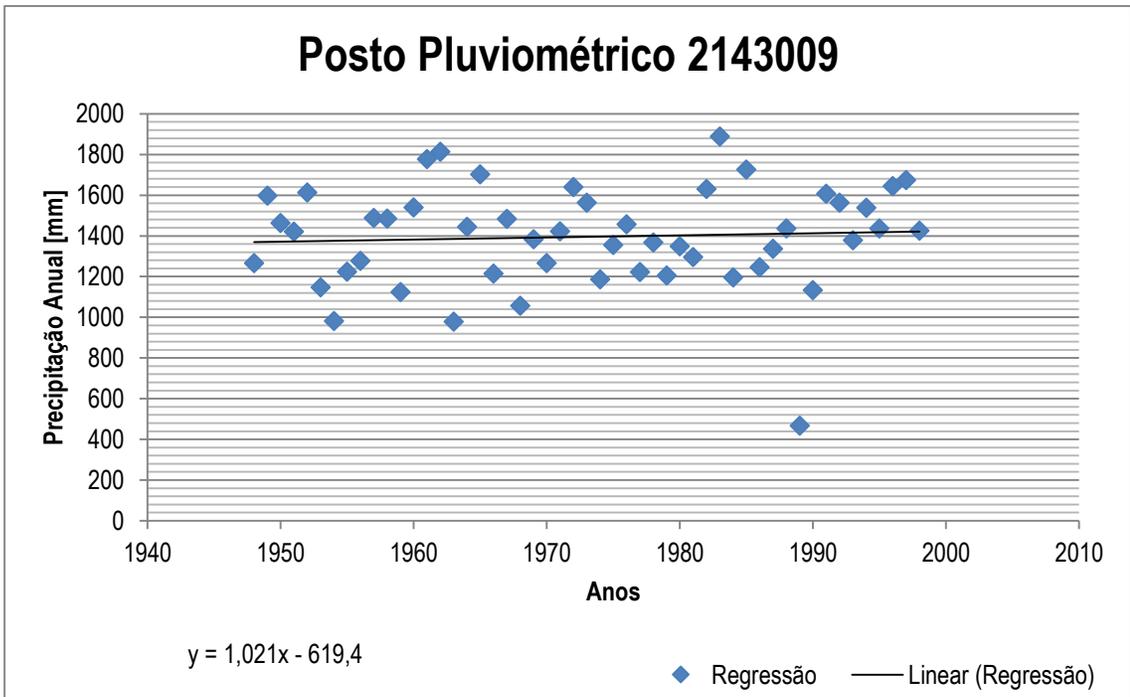
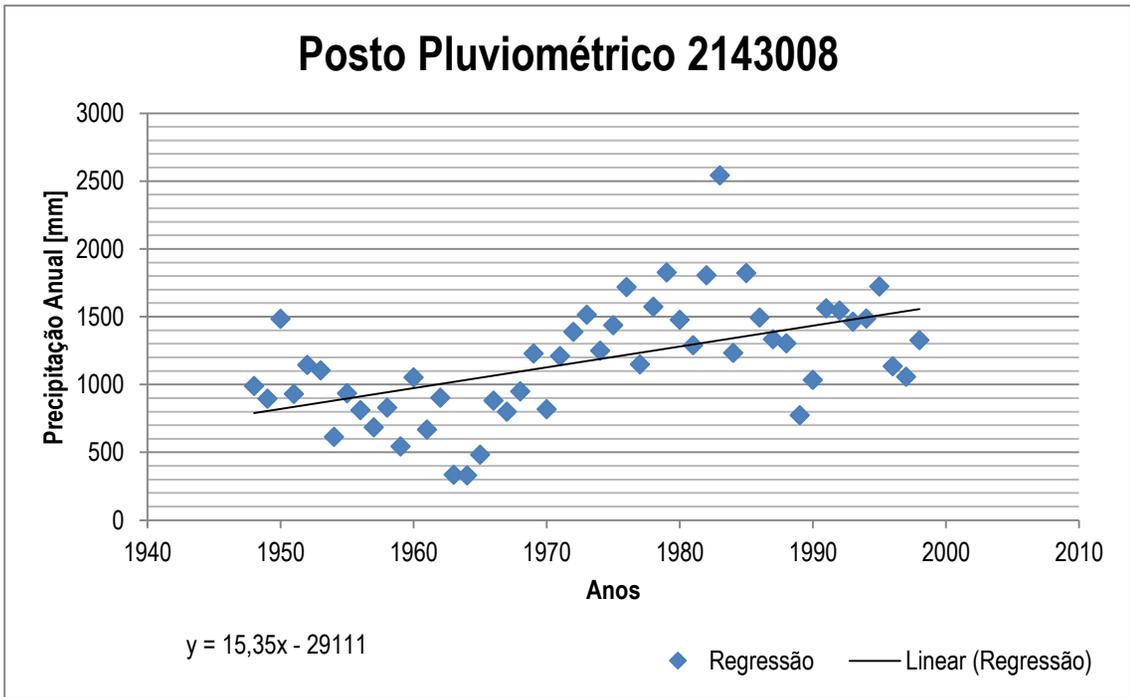


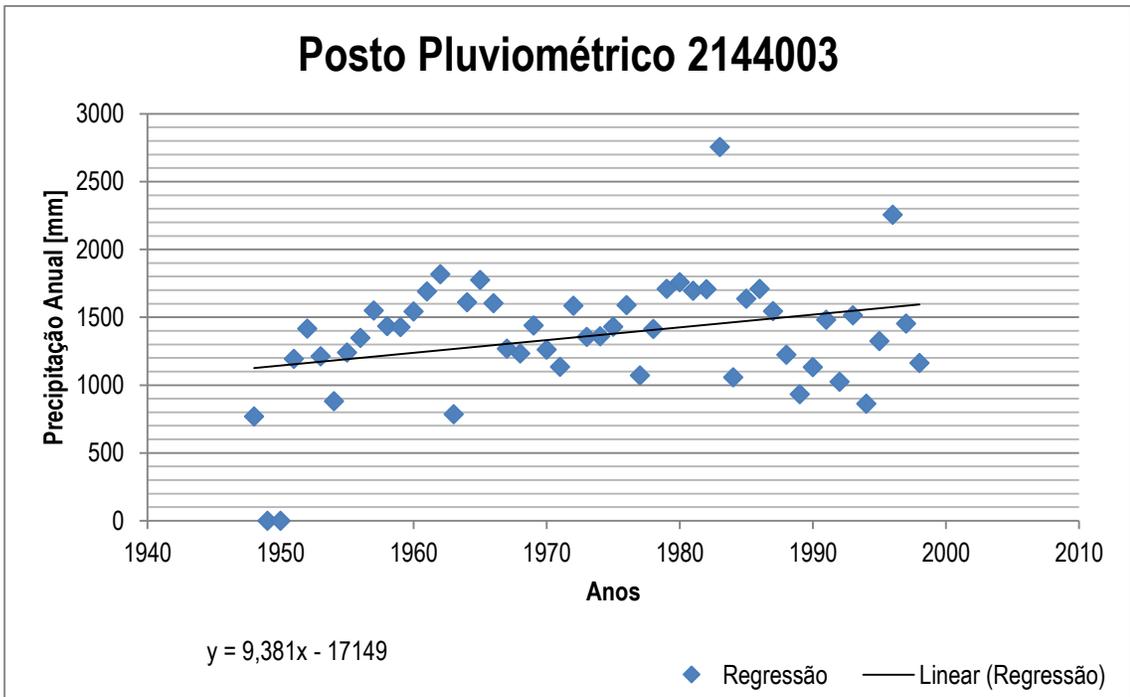
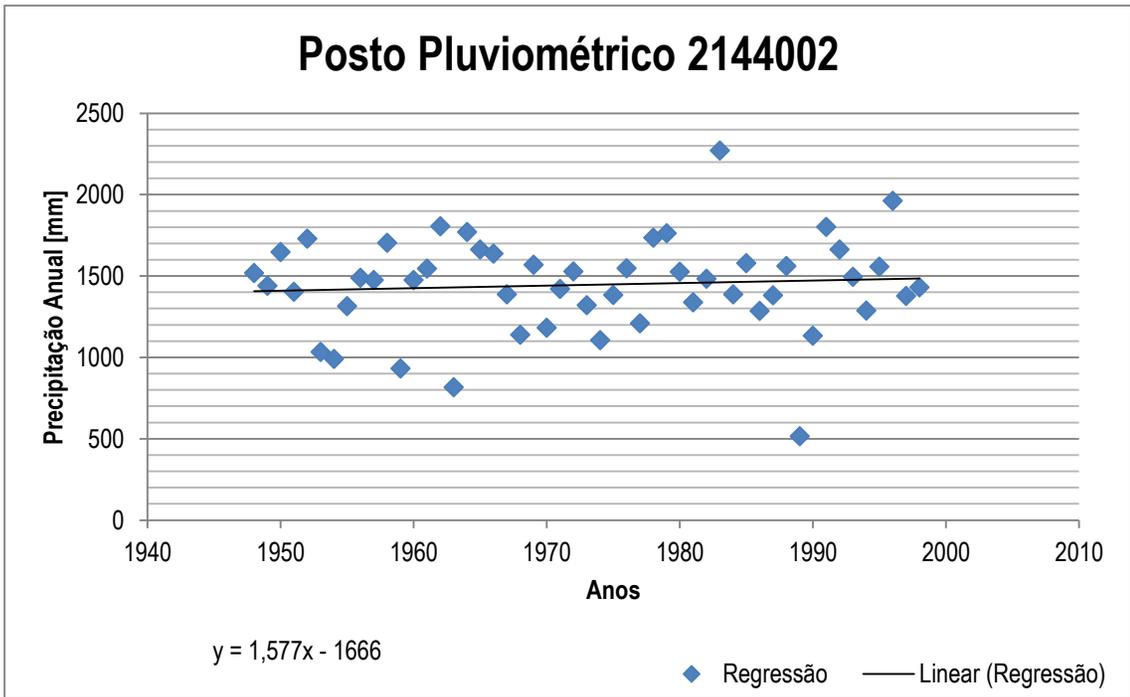


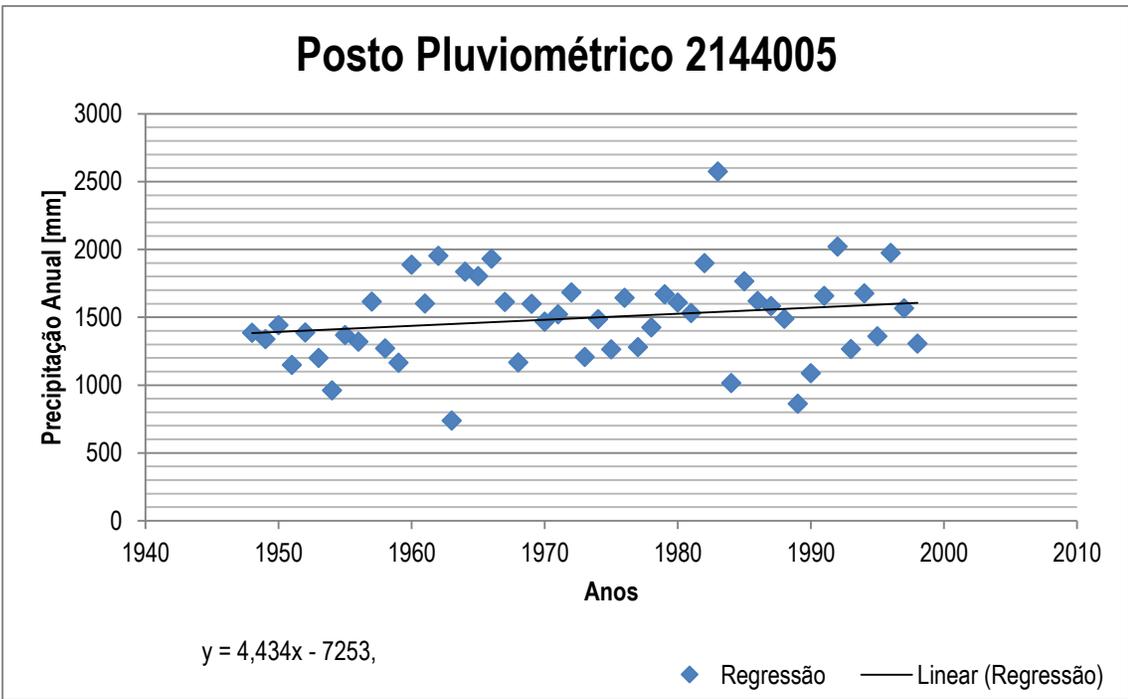
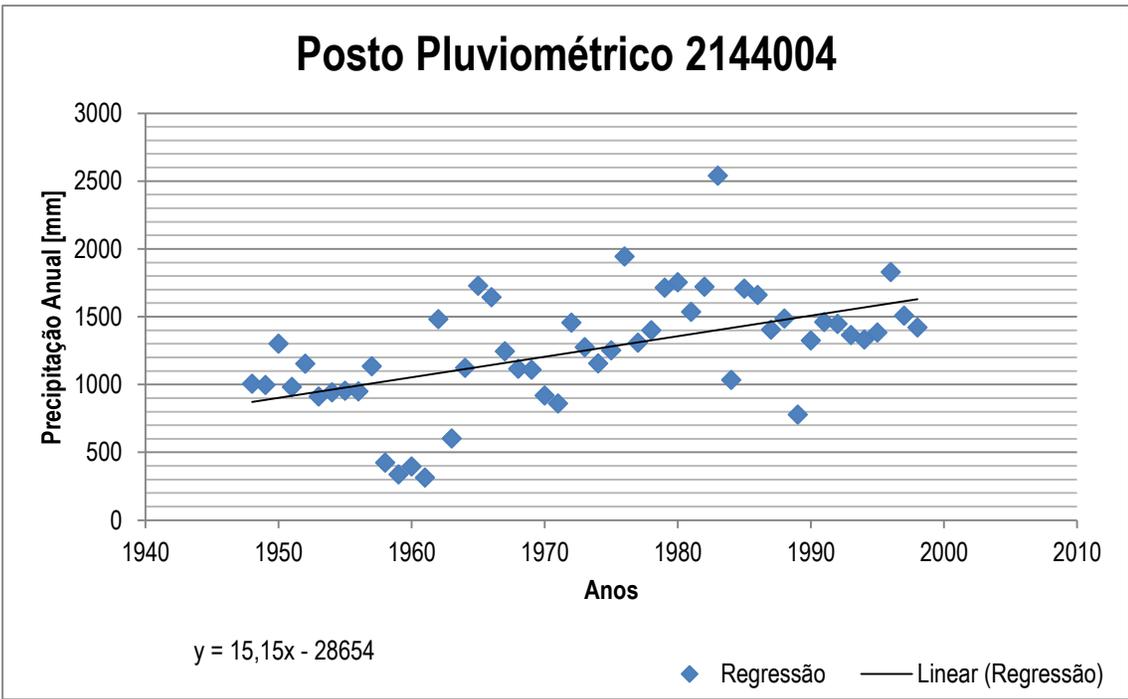


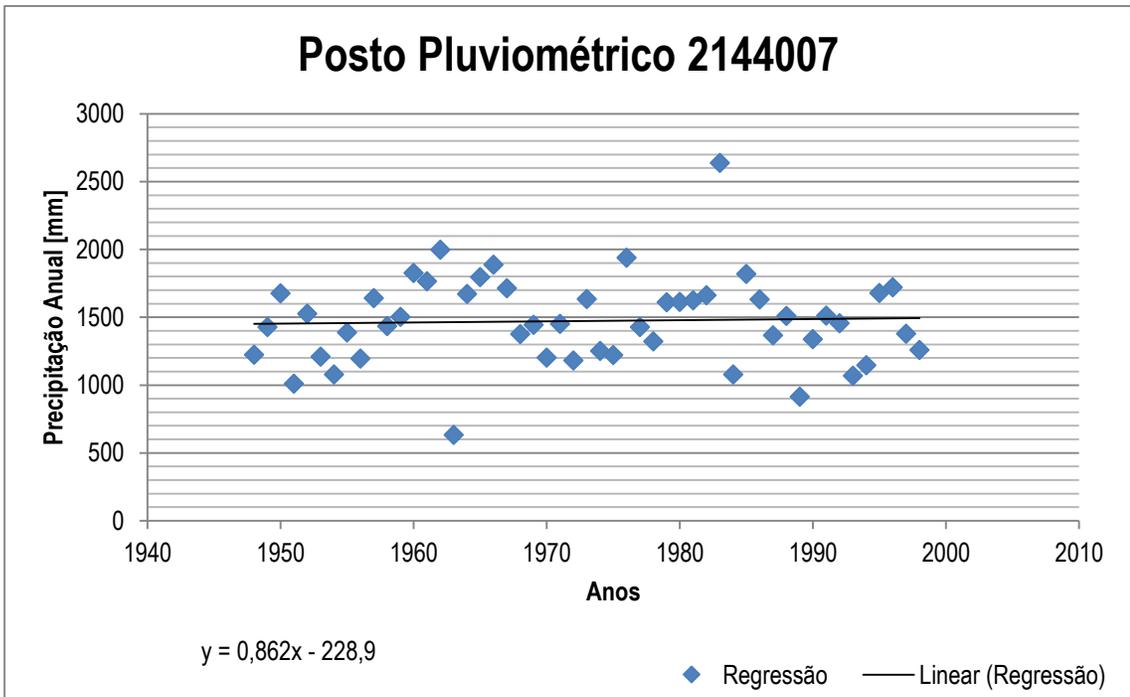
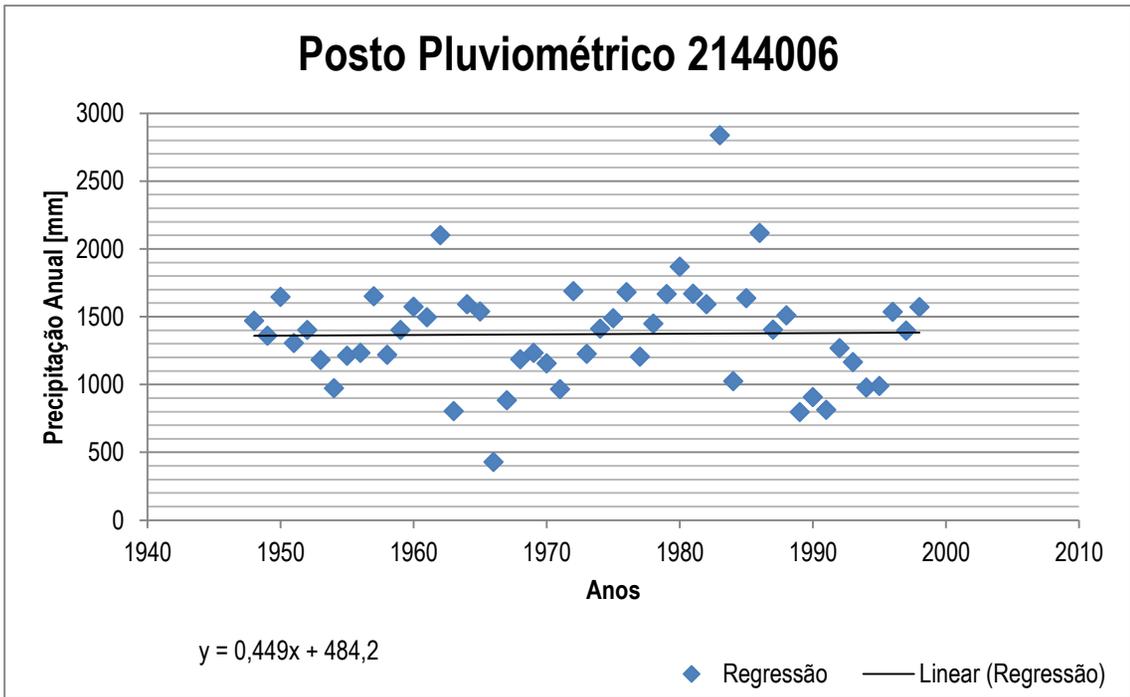
Apêndice D – Regressão

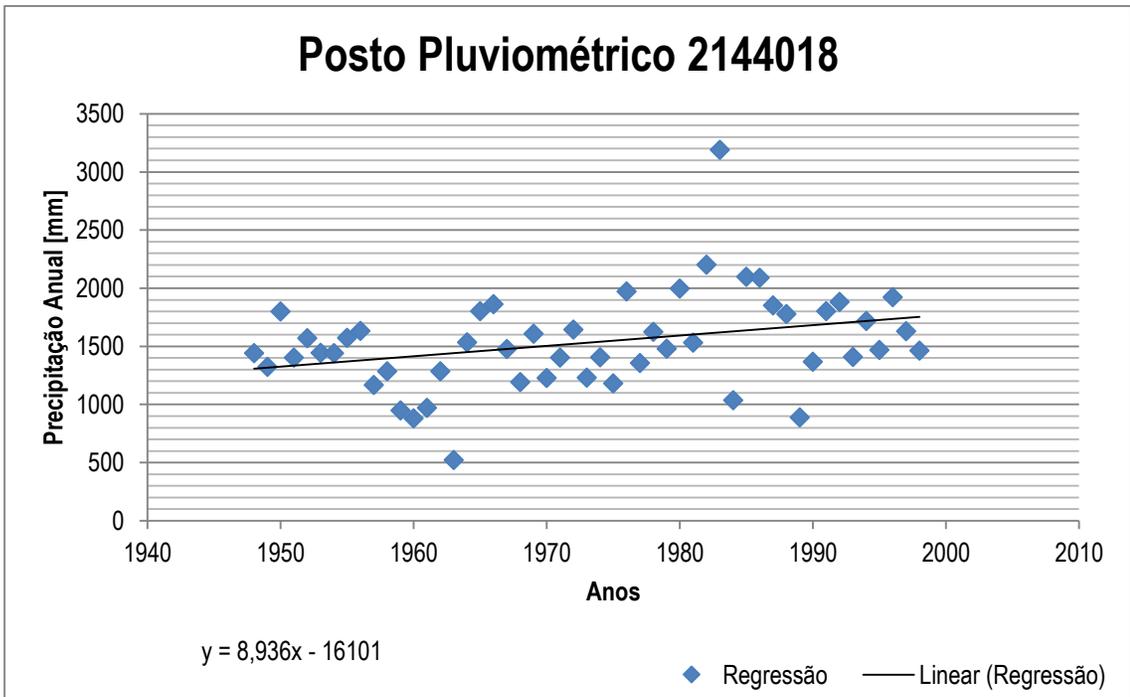
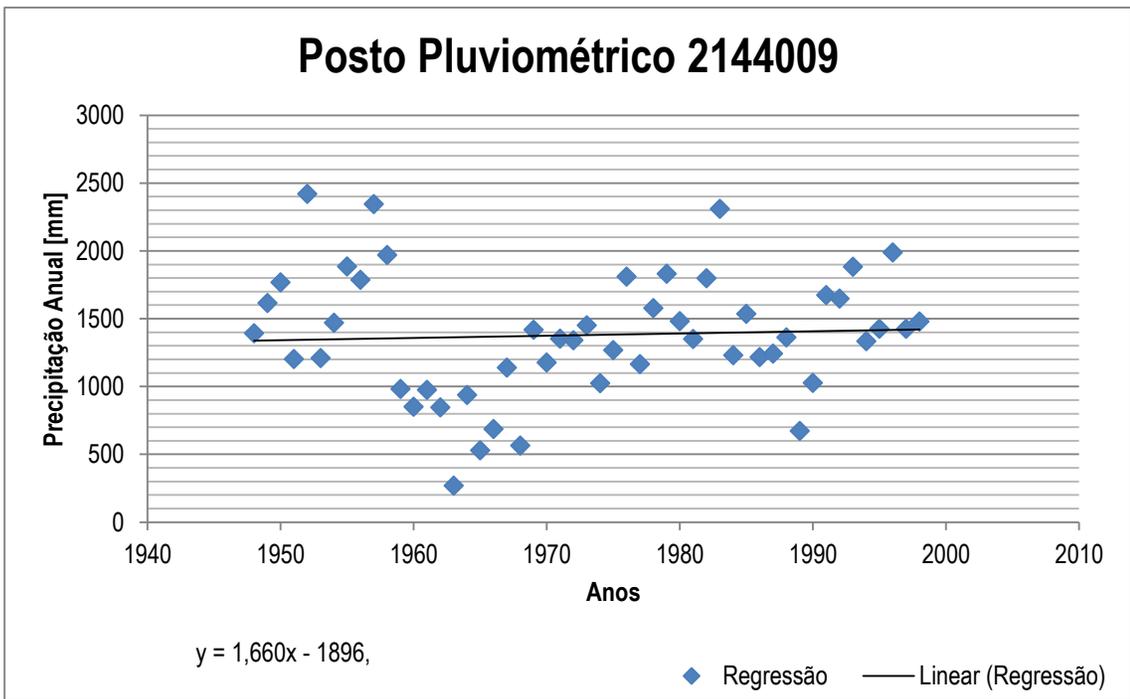


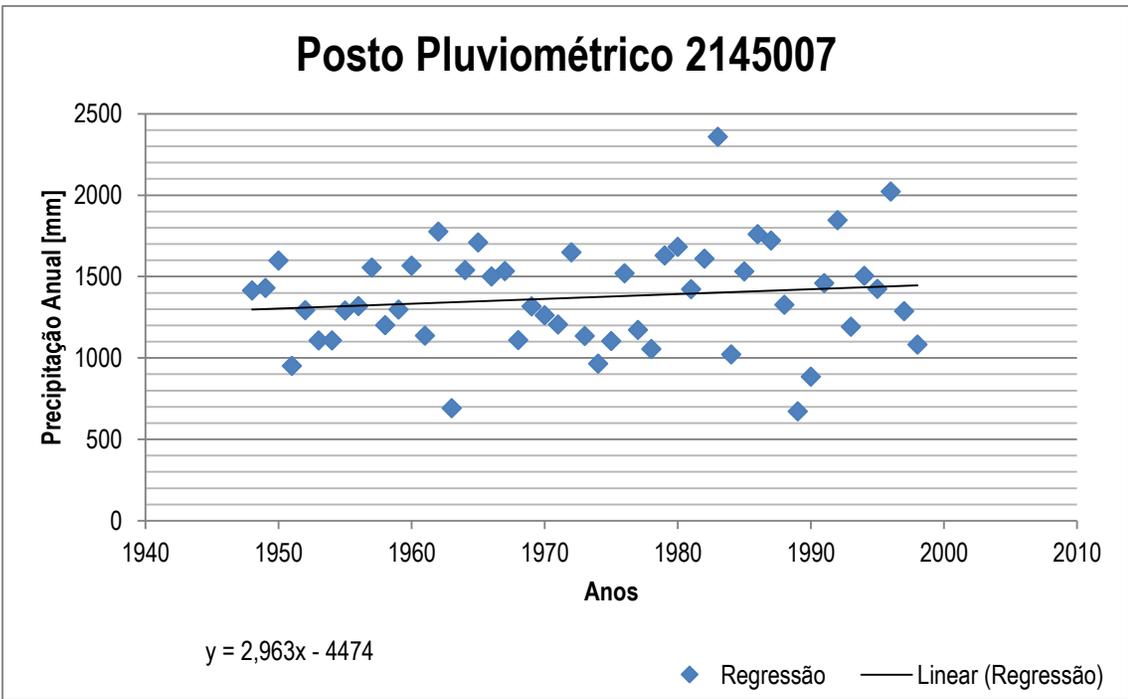
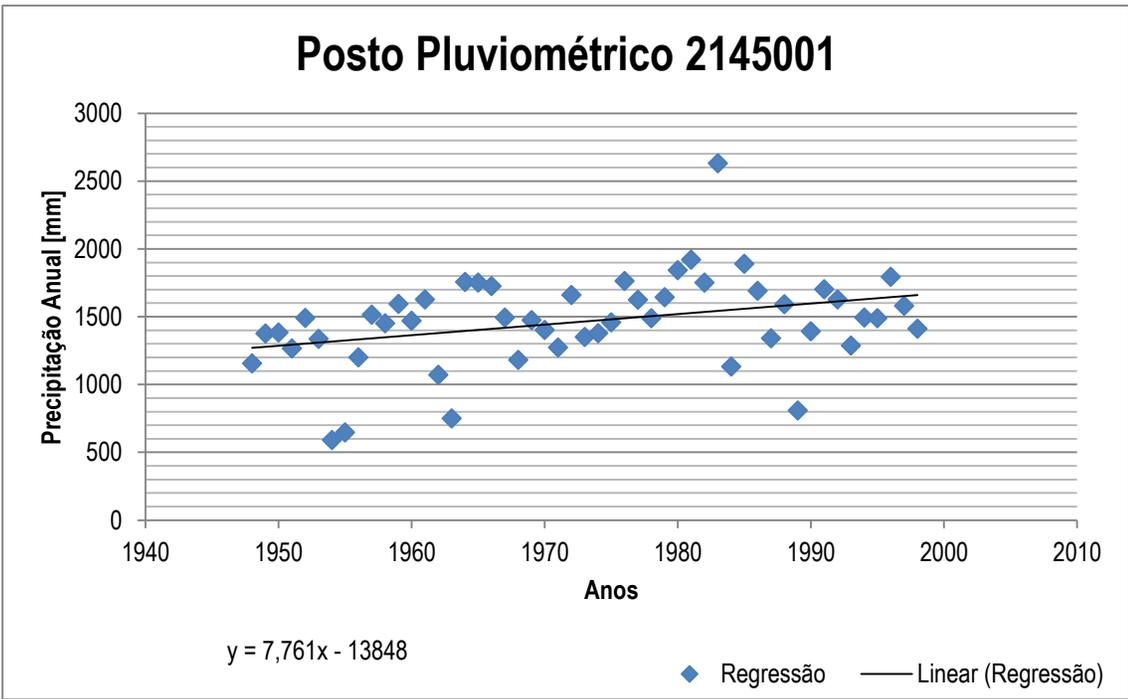


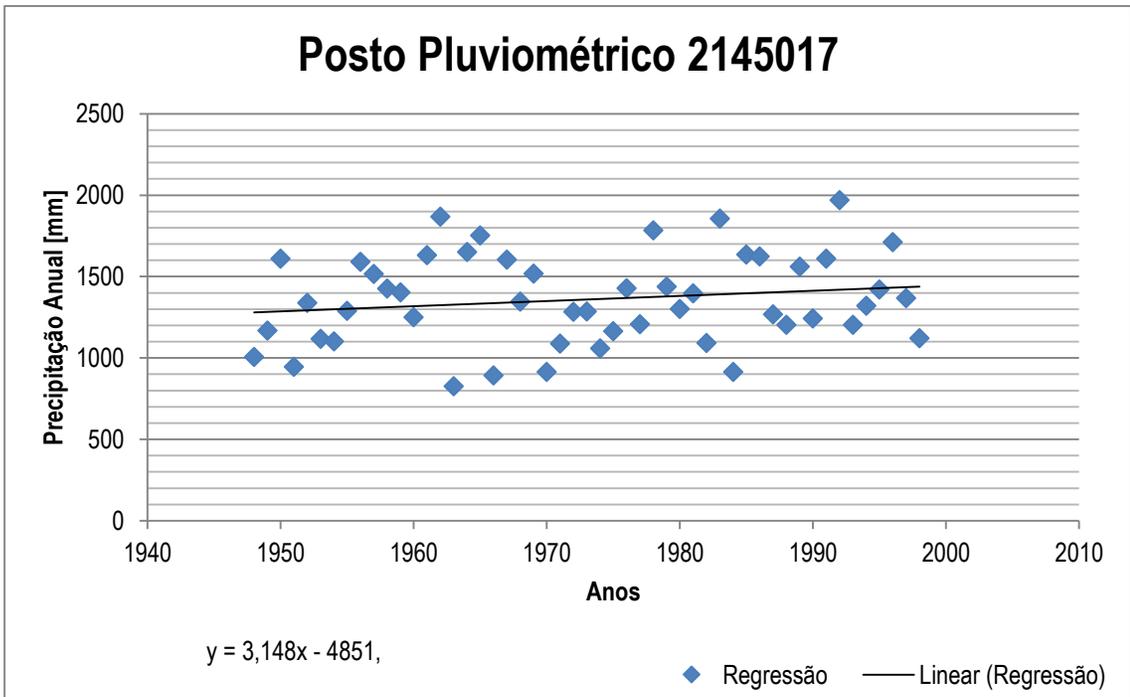
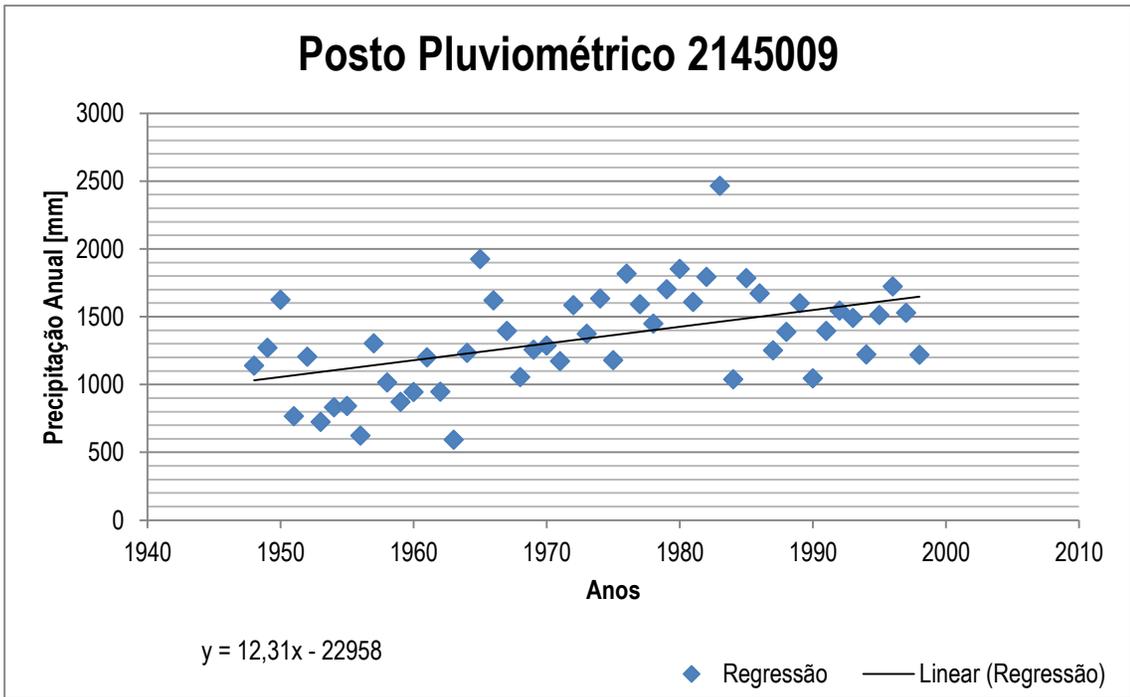


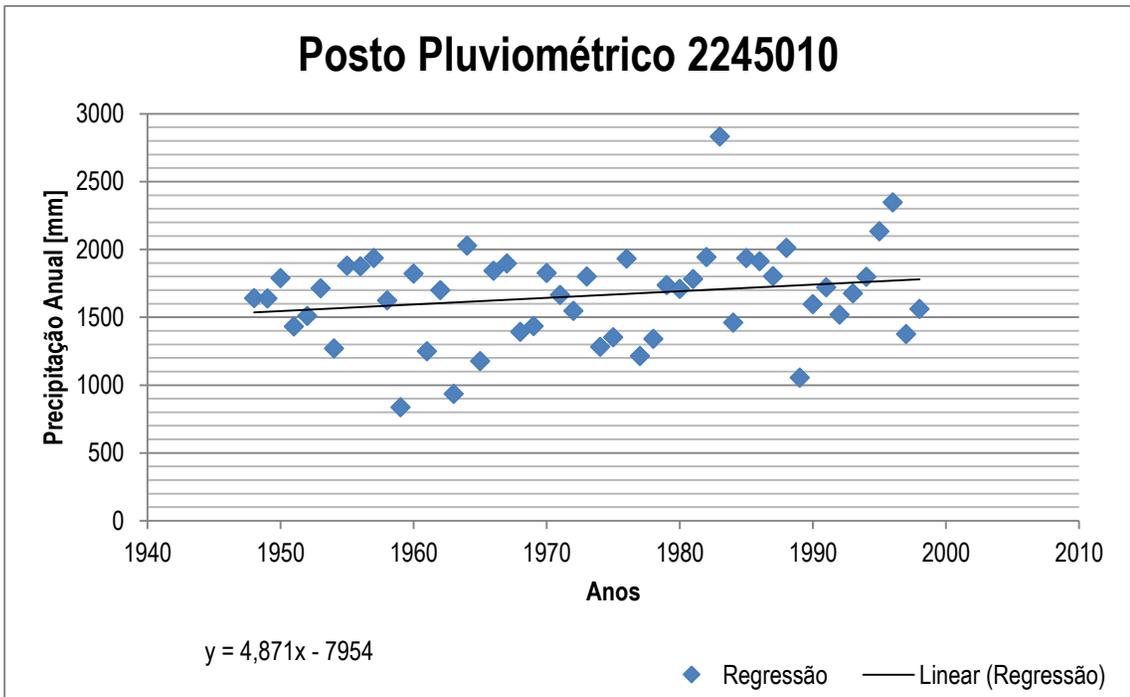
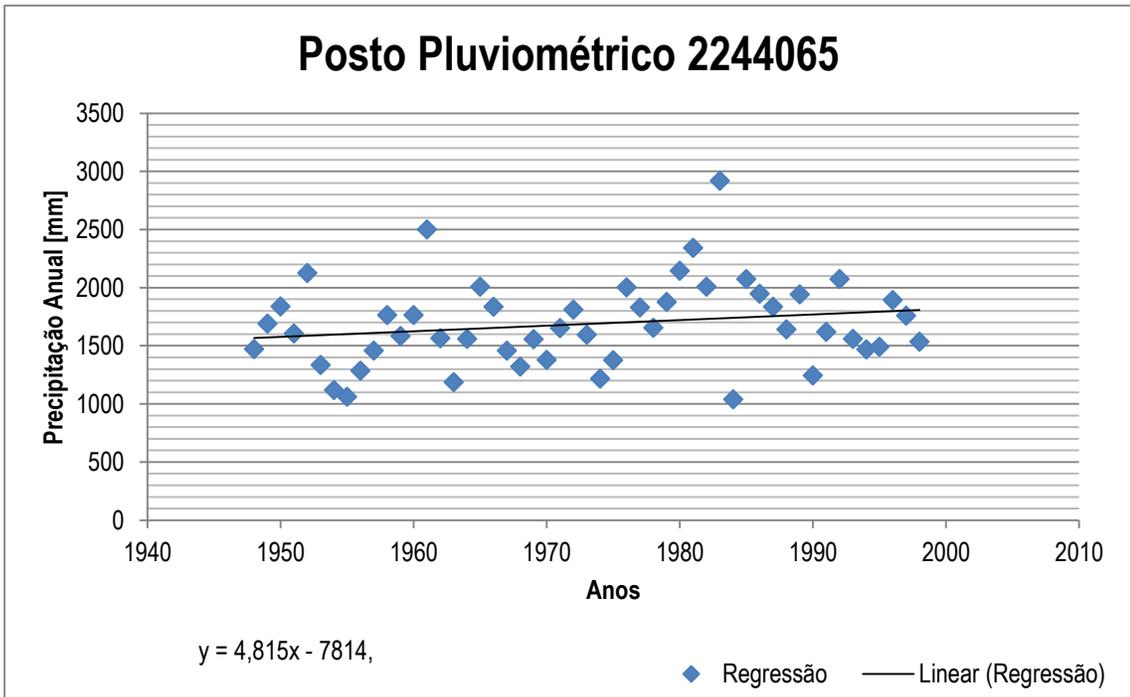


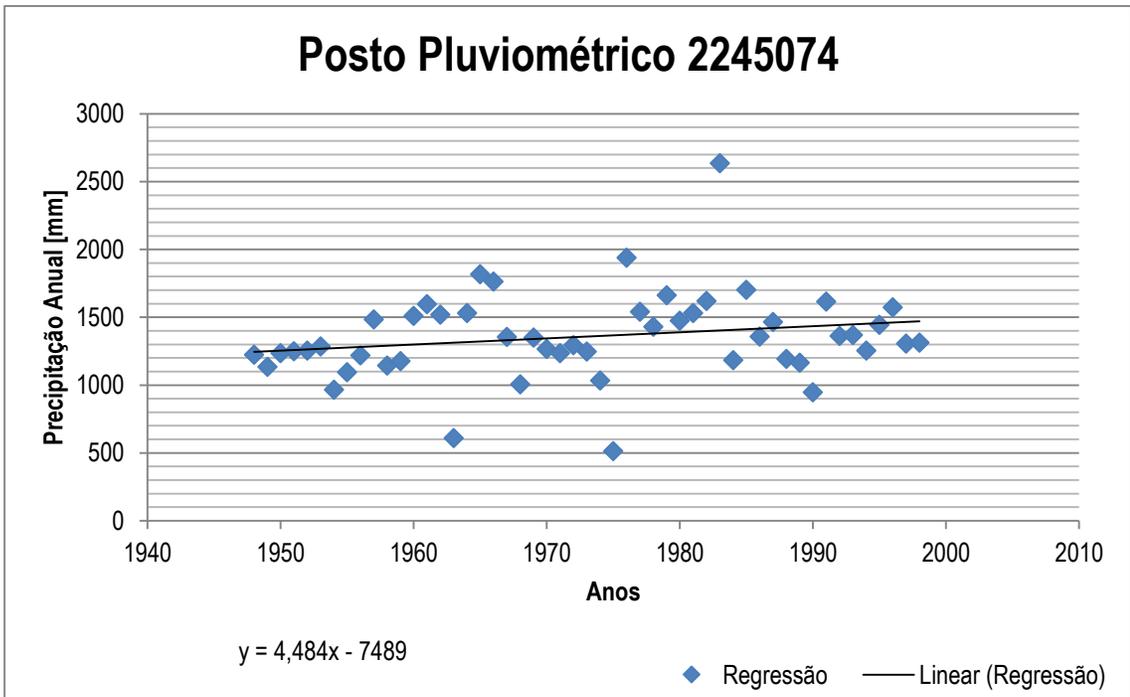
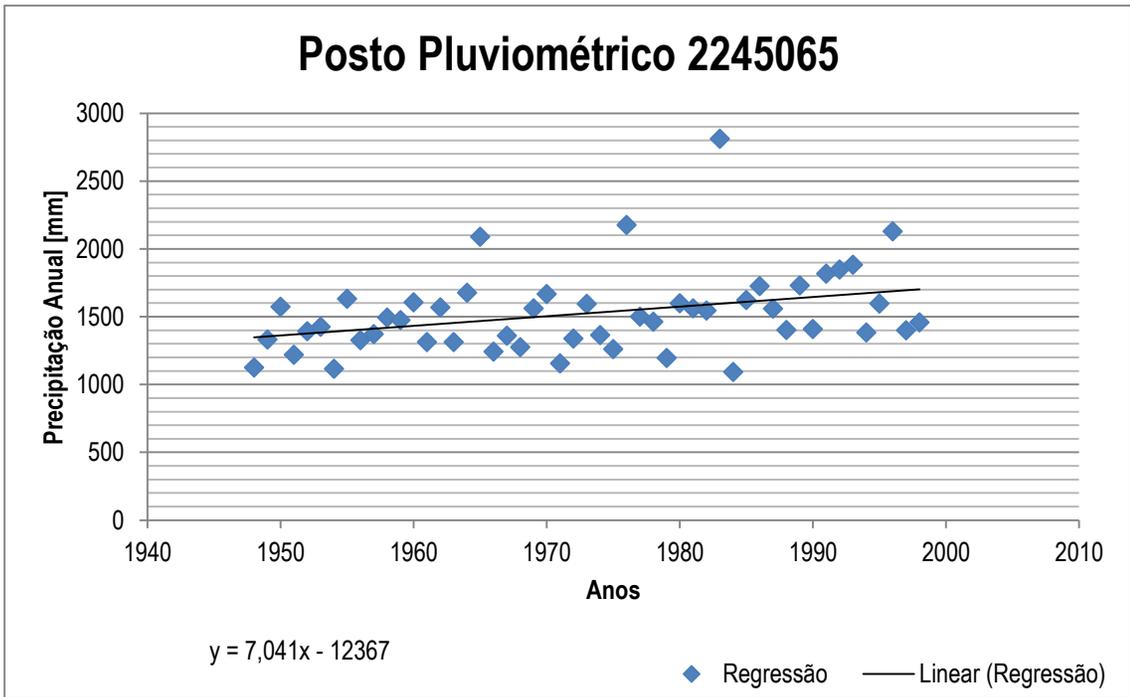


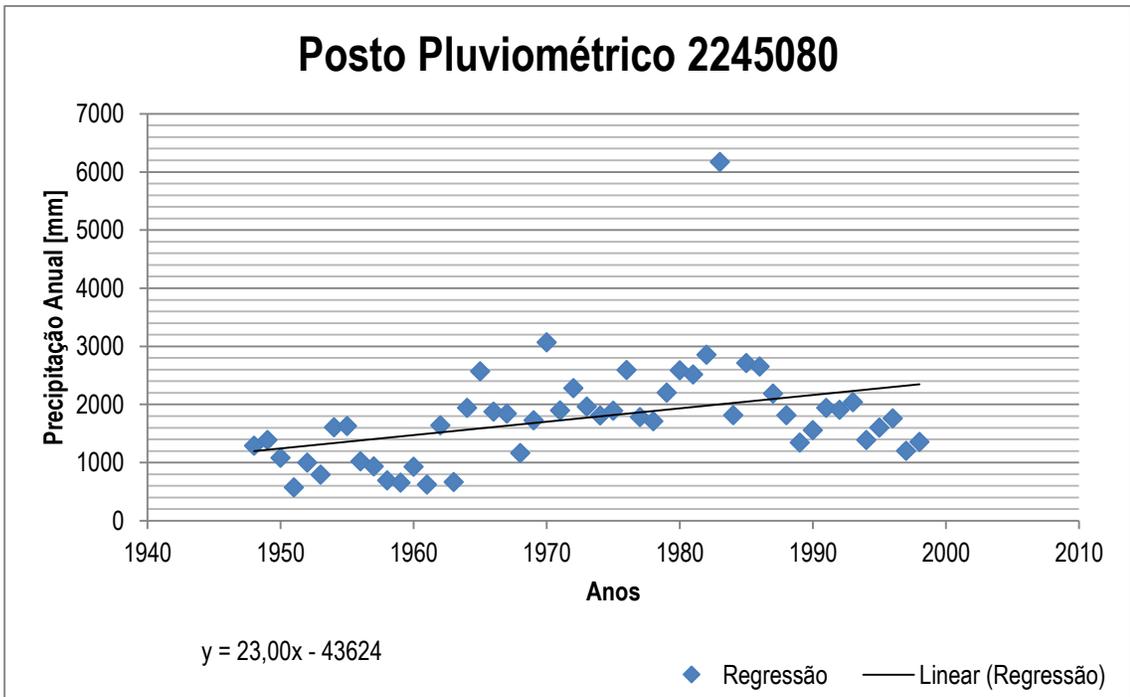
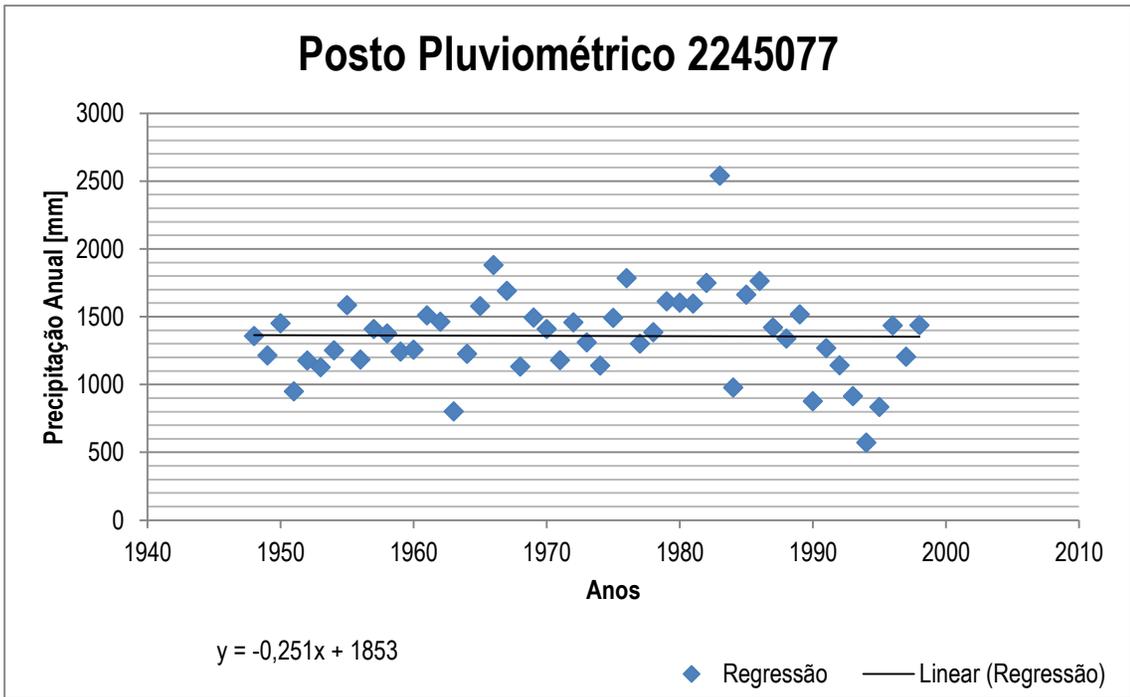












Apêndice E – Vazão defluente projetada para usina de Furnas: Simulação 3

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>2011</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>2012</b>	1091	1598	1372	1022	1007	1000	924	932	884	895	854	896
<b>2013</b>	864	879	1389	1136	759	752	747	783	765	733	716	758
<b>2014</b>	688	725	1685	1094	849	622	587	574	505	496	509	1397
<b>2015</b>	3482	1839	1560	1198	1167	1153	1096	1105	1094	1063	1030	975
<b>2016</b>	958	927	2315	1222	925	830	801	787	760	781	727	724
<b>2017</b>	745	1493	1161	926	1074	1069	1079	1064	1050	986	977	945
<b>2018</b>	957	937	975	1020	1208	1219	607	214	167	157	290	642
<b>2019</b>	1036	1005	1011	944	1092	1064	1044	1014	258	325	326	906
<b>2020</b>	889	876	891	904	1201	1173	1155	1154	1160	1109	1126	1067
<b>2021</b>	1098	1073	2979	1673	1179	962	934	906	860	846	864	796
<b>2022</b>	3003	3677	2513	2005	1216	1003	1018	970	931	900	905	883
<b>2023</b>	891	1519	1089	855	1230	1206	1197	1190	1130	1130	1082	1091
<b>2024</b>	1033	980	983	925	957	934	932	919	846	821	834	762
<b>2025</b>	753	765	760	712	671	864	868	801	792	834	757	771
<b>2026</b>	722	720	688	724	1125	1134	1091	1071	972	224	761	1018
<b>2027</b>	969	937	924	958	949	1295	1272	1183	257	242	669	1231
<b>2028</b>	1217	1164	1161	1107	1087	1055	1019	976	947	967	944	919
<b>2029</b>	914	908	891	862	984	1180	225	179	158	195	383	889
<b>2030</b>	853	845	817	763	849	1125	1073	1059	1047	836	707	995
<b>2031</b>	1021	998	960	1020	1072	1092	367	290	206	448	641	970
<b>2032</b>	955	929	888	939	923	914	866	879	801	841	826	797
<b>2033</b>	746	776	719	734	745	704	719	673	713	643	669	669
<b>2034</b>	624	580	635	1277	729	679	629	602	643	568	591	534
<b>2035</b>	511	1831	1114	1071	695	599	561	568	532	488	516	451
<b>2036</b>	501	2889	1446	1584	821	751	704	705	665	632	600	604
<b>2037</b>	603	556	1564	957	1114	1089	1048	1072	1029	1011	1012	987
<b>2038</b>	935	920	911	915	991	960	919	908	891	889	887	838
<b>2039</b>	848	855	793	777	848	963	945	908	891	891	850	836
<b>2040</b>	803	773	764	734	778	985	947	981	971	905	905	890
<b>2041</b>	845	852	3761	2968	2339	1944	1608	1324	1330	1257	1214	1173

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>2042</b>	3432	1921	1379	1234	1055	1046	1075	1062	993	965	991	963
<b>2043</b>	972	918	893	931	944	912	536	174	146	160	218	597
<b>2044</b>	709	552	480	361	265	207	192	109	98	177	360	653
<b>2045</b>	695	627	647	613	240	172	133	104	77	240	502	1424
<b>2046</b>	1413	1345	1336	1299	1430	1393	1361	1352	1335	558	735	1238
<b>2047</b>	1273	1204	1218	1170	1176	1182	1129	1143	1089	1067	1095	1044
<b>2048</b>	1054	1005	1503	1321	1175	981	928	951	938	931	870	884
<b>2049</b>	890	2248	1880	1419	911	822	736	753	697	689	698	664
<b>2050</b>	2524	2521	1597	1208	871	854	811	785	822	795	709	692
<b>2051</b>	673	674	898	720	539	545	494	473	527	505	463	437
<b>2052</b>	1823	1309	1033	884	1004	1014	985	948	950	922	929	881
<b>2053</b>	865	908	3238	1720	1238	1038	896	916	865	850	836	758
<b>2054</b>	2031	1626	1330	1134	939	941	922	886	902	862	859	837
<b>2055</b>	798	773	781	784	835	817	765	797	756	696	708	608
<b>2056</b>	617	1882	1427	1214	1028	1015	959	991	947	905	880	914
<b>2057</b>	871	1098	1255	1173	1164	1121	1126	1061	1047	1003	988	928
<b>2058</b>	953	881	882	838	967	957	608	187	159	232	274	824
<b>2059</b>	826	846	826	863	1018	345	228	178	139	430	599	681
<b>2060</b>	928	860	621	465	299	255	181	136	103	119	173	1127
<b>2061</b>	1078	1082	1021	1027	1165	1148	315	241	193	209	698	565
<b>2062</b>	380	770	775	640	392	274	203	156	120	165	327	506
<b>2063</b>	1349	1345	1276	553	368	356	250	188	159	220	266	1595
<b>2064</b>	1240	1743	1747	1692	1700	1658	1442	705	421	406	435	1326
<b>2065</b>	1342	1276	1285	1298	1261	1207	1206	617	329	281	272	1161
<b>2066</b>	1131	1101	1065	1029	982	964	946	961	927	895	884	895
<b>2067</b>	847	1421	1228	813	1074	1082	1063	1045	1028	1031	965	940
<b>2068</b>	958	901	887	923	1011	963	968	952	897	906	840	827
<b>2069</b>	773	747	765	719	1127	959	929	940	885	854	883	815
<b>2070</b>	868	1092	1095	1214	778	785	784	732	716	688	619	625
<b>2071</b>	629	4796	3929	2975	2539	2140	1720	1406	1159	1085	1072	2395
<b>2072</b>	2809	2123	1878	1105	950	1285	1241	1263	1245	1195	1203	1123
<b>2073</b>	1170	1153	1090	1125	1117	1038	756	274	214	217	151	704
<b>2074</b>	839	801	667	467	262	226	159	120	89	64	78	735
<b>2075</b>	686	643	651	592	939	988	956	921	922	930	856	864
<b>2076</b>	830	769	767	748	928	951	910	892	884	890	876	843
<b>2077</b>	813	743	784	1181	1175	1103	1025	228	179	204	434	1039
<b>2078</b>	1023	996	964	932	902	925	862	887	865	835	833	818

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>2079</b>	749	757	701	728	855	785	219	169	133	128	622	723
<b>2080</b>	667	684	706	664	797	960	945	889	178	146	211	427
<b>2081</b>	770	747	698	701	679	624	582	555	550	503	485	508
<b>2082</b>	507	465	463	561	1027	1204	1187	1164	680	139	340	711
<b>2083</b>	1091	1028	1053	1022	1007	1000	924	932	884	895	719	896
<b>2084</b>	864	879	812	796	759	752	747	783	765	664	372	758
<b>2085</b>	688	725	703	656	647	622	587	574	505	496	509	474
<b>2086</b>	474	3938	2228	1437	1514	1153	1096	1105	1094	1063	1030	975
<b>2087</b>	958	927	894	816	813	813	801	787	760	781	727	724
<b>2088</b>	745	668	642	625	1074	1069	1079	1064	1050	986	977	945
<b>2089</b>	957	937	3043	1487	1208	1219	607	664	533	509	660	1516
<b>2090</b>	3836	3718	2165	1638	1092	1064	1044	1014	258	325	326	906
<b>2091</b>	3383	3443	3817	1862	1257	1173	1155	1154	1160	1109	1126	1067
<b>2092</b>	1098	1073	2979	1634	1179	962	934	906	860	846	864	796
<b>2093</b>	3727	3677	850	1401	1216	1003	1018	970	931	900	905	883
<b>2094</b>	891	1519	1089	855	1230	1206	1197	516	194	648	171	515
<b>2095</b>	1033	980	983	925	551	313	245	191	149	130	214	689
<b>2096</b>	753	634	760	459	312	238	180	134	99	187	316	771
<b>2097</b>	722	720	688	724	1125	1134	1091	1071	972	224	761	1018
<b>2098</b>	969	937	1777	1491	1280	1295	1272	1183	257	242	669	1231
<b>2099</b>	1217	1164	1359	1107	1087	1055	1019	976	947	967	944	919

Apêndice F – Vazão defluente projetada para usina de Furnas: Simulação 4

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>2011</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>2012</b>	1091	1598	1372	1022	1007	1000	924	932	884	895	854	896
<b>2013</b>	864	879	1389	1136	759	752	747	783	765	733	716	758
<b>2014</b>	688	725	1685	1094	849	622	587	574	505	496	509	1397
<b>2015</b>	3482	1839	1560	1198	1167	1153	1096	1105	1094	1063	1030	975
<b>2016</b>	958	927	2315	1222	925	830	801	787	760	781	727	724
<b>2017</b>	745	1493	1161	926	1074	1069	1079	1064	1050	986	977	945
<b>2018</b>	957	937	975	1020	1208	1219	607	214	167	157	247	546
<b>2019</b>	1036	1005	1011	802	651	439	344	288	219	276	277	906
<b>2020</b>	889	876	891	1304	1201	1173	1155	1154	1160	631	782	1067
<b>2021</b>	1098	3065	2979	1673	1179	962	934	906	860	846	864	1852
<b>2022</b>	2552	3677	2513	2005	1216	1003	1018	970	931	900	905	883
<b>2023</b>	891	1519	1089	855	1230	1206	1197	848	229	1130	1082	1091
<b>2024</b>	1033	980	983	925	957	934	932	919	846	821	834	762
<b>2025</b>	753	765	760	712	671	864	868	801	792	834	757	771
<b>2026</b>	722	720	688	724	1125	1134	1091	1071	972	224	761	1018
<b>2027</b>	969	937	924	958	949	449	349	275	218	205	569	1231
<b>2028</b>	1217	1164	1744	1149	1087	1055	1019	976	947	967	590	680
<b>2029</b>	914	908	891	862	984	1180	191	152	135	166	326	1038
<b>2030</b>	1108	1140	1531	1412	835	605	460	362	287	319	707	995
<b>2031</b>	1021	998	960	586	448	379	367	290	206	448	641	970
<b>2032</b>	955	2595	1424	939	923	914	866	879	801	841	826	797
<b>2033</b>	746	776	719	836	745	704	719	673	713	643	669	669
<b>2034</b>	624	580	635	1277	729	679	629	602	643	568	591	534
<b>2035</b>	511	1831	1114	1071	695	567	561	568	532	488	516	451
<b>2036</b>	501	2889	1446	1584	821	751	704	705	665	632	600	604
<b>2037</b>	603	556	1564	957	1114	1089	1048	1072	1029	1011	1012	987
<b>2038</b>	935	920	911	915	991	960	919	908	891	889	887	838
<b>2039</b>	848	855	793	777	550	516	368	279	229	297	767	1084
<b>2040</b>	1331	1615	1568	962	608	480	378	319	277	370	867	2254
<b>2041</b>	3680	3666	3761	2968	2339	1944	1608	1324	1137	1124	1133	2117
<b>2042</b>	3432	1921	1379	1234	1055	1046	1075	1062	993	888	468	748
<b>2043</b>	460	299	794	782	386	273	210	174	146	160	218	597

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>2044</b>	709	552	480	361	265	207	192	109	98	177	360	653
<b>2045</b>	695	627	647	613	240	172	133	104	77	240	502	1424
<b>2046</b>	1413	1345	1336	1299	1430	1393	1361	1352	1335	558	735	1238
<b>2047</b>	1273	1204	1949	1335	1176	1182	1129	1143	1089	1067	1095	1044
<b>2048</b>	1054	2160	1503	1321	1175	981	928	951	938	931	870	884
<b>2049</b>	890	2248	1880	1419	911	822	736	753	697	689	698	664
<b>2050</b>	2524	2521	1597	1208	871	854	811	785	822	795	709	692
<b>2051</b>	673	674	898	720	539	545	494	473	527	505	463	437
<b>2052</b>	1823	1309	1033	884	1004	1014	985	948	950	922	929	881
<b>2053</b>	865	908	3238	1720	1238	1038	896	916	865	850	836	758
<b>2054</b>	2031	1626	1330	1134	939	941	922	886	902	862	859	837
<b>2055</b>	798	773	781	784	835	817	765	797	756	696	708	608
<b>2056</b>	617	1882	1427	1214	1028	1015	959	991	947	905	880	914
<b>2057</b>	871	1098	1255	1173	1164	1121	1126	1061	1047	1003	988	928
<b>2058</b>	953	881	882	838	967	957	608	187	159	232	274	824
<b>2059</b>	826	656	463	357	298	293	194	151	118	365	509	579
<b>2060</b>	789	731	528	395	254	216	153	115	87	101	147	1127
<b>2061</b>	1540	1365	1093	707	507	395	307	241	193	209	698	565
<b>2062</b>	380	770	775	640	392	274	203	156	120	165	327	506
<b>2063</b>	1554	1376	1038	553	368	356	250	188	159	220	266	1595
<b>2064</b>	1240	1743	1747	1692	1700	1658	1442	705	421	406	435	1326
<b>2065</b>	1342	1276	1285	1298	1261	1207	1206	617	329	281	272	1161
<b>2066</b>	1131	2103	1450	2369	1457	992	946	961	927	895	884	895
<b>2067</b>	2355	1421	1228	813	1074	1082	1063	1045	1028	1031	965	940
<b>2068</b>	958	901	887	923	1011	963	968	952	897	906	840	827
<b>2069</b>	773	747	765	719	1127	959	929	940	885	854	883	815
<b>2070</b>	868	1092	1095	1214	778	785	784	732	716	688	619	625
<b>2071</b>	629	4796	3929	2975	2539	2140	1720	1406	1159	1085	1072	2395
<b>2072</b>	2809	2123	1878	1105	950	1285	1241	1263	1245	1195	1203	1123
<b>2073</b>	1170	1153	1090	1125	1117	1038	756	233	182	184	128	599
<b>2074</b>	839	590	531	397	222	192	135	102	76	55	66	735
<b>2075</b>	686	643	651	592	939	988	956	921	922	430	228	864
<b>2076</b>	830	769	1031	1214	928	951	910	892	884	836	317	291
<b>2077</b>	915	1312	1073	724	410	464	316	228	179	204	434	1039
<b>2078</b>	1023	996	964	932	902	925	862	887	865	835	833	818
<b>2079</b>	749	757	701	728	855	785	770	830	850	820	780	723
<b>2080</b>	667	684	706	664	797	960	945	194	151	124	179	363

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>2081</b>	770	747	698	701	413	315	260	193	151	276	397	508
<b>2082</b>	507	850	695	561	1027	1204	1187	618	155	139	340	711
<b>2083</b>	1091	1028	1053	1022	1007	1000	924	932	884	895	719	896
<b>2084</b>	864	845	812	796	759	752	747	783	765	664	372	758
<b>2085</b>	688	725	990	728	647	622	587	574	505	496	509	474
<b>2086</b>	5246	3938	2228	1437	1514	1153	1096	1105	1094	1063	1030	975
<b>2087</b>	958	927	894	816	813	813	801	787	760	781	727	724
<b>2088</b>	745	668	642	625	1074	1069	1079	1064	1050	986	977	945
<b>2089</b>	957	937	3043	1487	1208	1219	607	664	533	509	660	1516
<b>2090</b>	3836	3718	2165	1638	1092	1064	1044	1014	258	325	326	906
<b>2091</b>	3383	3443	3817	1862	1257	1173	1155	1154	1160	1109	1126	1067
<b>2092</b>	1098	1073	1019	1634	946	933	934	906	860	846	864	796
<b>2093</b>	3727	2724	2049	1401	1044	978	1018	970	931	900	905	883
<b>2094</b>	891	830	877	855	1230	1206	1197	516	194	648	171	515
<b>2095</b>	1033	980	983	925	551	313	245	191	149	300	182	586
<b>2096</b>	790	389	652	385	265	202	153	114	84	159	269	670
<b>2097</b>	722	720	2290	1307	1125	1134	1091	1071	972	224	761	1018
<b>2098</b>	969	2833	1510	1491	1280	1295	1272	1183	257	242	531	1231
<b>2099</b>	1217	1164	1359	1107	1087	1055	1019	976	947	967	944	0



## Anexos

## Anexo A – Histórico das cotas de Furnas

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>1963</b>									755	755	756	756
<b>1964</b>	756	758	760	760	760	760	759	759	758	757	757	758
<b>1965</b>	761	761	765	765	766	766	766	765	765	765	765	765
<b>1966</b>	764	764	765	766	766	766	766	766	765	763	763	761
<b>1967</b>	762	764	764	765	765	765	765	764	762	761	760	759
<b>1968</b>	760	760	761	761	761	761	760	759	758	758	757	758
<b>1969</b>	759	759	760	760	759	758	756	755	753	751	753	755
<b>1970</b>	758	760	762	764	764	763	763	762	762	762	762	762
<b>1971</b>	762	761	761	760	759	759	758	758	757	756	755	757
<b>1972</b>	759	762	765	766	766	766	765	765	764	764	764	765
<b>1973</b>	766	766	766	766	766	766	765	764	763	762	761	762
<b>1974</b>	764	766	767	767	767	767	766	765	764	763	762	761
<b>1975</b>	763	765	766	766	765	764	763	762	760	758	758	759
<b>1976</b>	760	761	763	764	764	765	765	765	766	766	767	767
<b>1977</b>	767	766	766	767	766	766	766	765	763	762	761	763
<b>1978</b>	765	766	766	766	766	765	765	763	761	760	758	759
<b>1979</b>	761	764	766	767	767	767	766	765	765	764	764	765
<b>1980</b>	766	767	767	767	767	767	767	766	765	765	764	765
<b>1981</b>	767	767	768	768	768	768	768	767	766	765	766	767
<b>1982</b>	767	767	768	768	768	768	768	767	767	766	766	767
<b>1983</b>	767	768	768	768	768	768	768	767	767	767	766	767
<b>1984</b>	767	767	767	768	768	767	766	765	764	763	763	763
<b>1985</b>	766	767	768	768	768	768	767	765	764	762	761	760
<b>1986</b>	761	762	763	763	763	762	761	760	759	756	755	756
<b>1987</b>	760	763	765	766	766	766	766	766	765	764	763	764
<b>1988</b>	766	767	768	768	768	768	767	767	766	765	764	763
<b>1989</b>	765	767	768	768	768	767	766	766	765	764	763	764
<b>1990</b>	766	767	767	768	768	768	767	766	766	765	765	764
<b>1991</b>	766	767	768	768	768	768	768	767	766	765	764	764
<b>1992</b>	766	768	768	768	768	768	768	768	767	767	767	767
<b>1993</b>	767	767	768	768	768	768	767	766	765	765	764	763

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>1994</b>	765	766	767	767	767	767	766	765	763	762	760	760
<b>1995</b>	761	764	766	767	767	767	766	765	763	762	762	761
<b>1996</b>	763	764	765	766	766	766	765	763	762	762	762	764
<b>1997</b>	766	768	768	768	767	767	767	767	766	765	763	764
<b>1998</b>	765	765	766	766	765	764	763	762	760	759	758	757
<b>1999</b>	759	761	763	764	763	763	761	760	758	755	753	752
<b>2000</b>	755	758	761	762	761	759	758	757	756	754	753	754
<b>2001</b>	756	756	756	755	755	755	754	754	754	754	754	756
<b>2002</b>	759	762	765	766	766	766	765	764	764	763	762	762
<b>2003</b>	765	767	768	768	768	767	767	766	764	763	762	762
<b>2004</b>	763	765	767	768	768	768	768	767	767	766	766	766
<b>2005</b>	767	767	768	768	768	768	768	767	766	766	765	766
<b>2006</b>	767	767	767	768	767	767	766	765	763	761	760	760
<b>2007</b>	764	767	768	768	768	768	767	766	765	764	763	762
<b>2008</b>	763	764	767	768	768	768	767	766	766	765	764	765
<b>2009</b>	767	768	768	768	768	768	767	767	766	766	766	766
<b>2010</b>	767	767	768	768	767	767	766	765	764	762	761	762
<b>2011</b>	766	767	768	768	768	768	767	766	764	764	762	764
<b>2012</b>	767	767	767	766	765	765	764	763	760	757	754	753

Fonte: Furnas (2012).

## Anexo B – Geração de Furnas (GWh)

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>	<b>TOTAL</b>
<b>1963</b>									50	90	90	170	400
<b>1964</b>	200	180	200	260	290	280	320	315	315	310	320	370	3360
<b>1965</b>	380	330	290	330	170	190	220	160	215	175	180	320	2960
<b>1966</b>	295	315	360	240	350	390	410	420	380	340	270	280	4050
<b>1967</b>	260	310	380	420	440	435	380	365	375	400	380	375	4520
<b>1968</b>	370	400	330	385	365	305	345	340	330	330	370	340	4210
<b>1969</b>	470	450	505	460	470	415	465	415	415	385	245	260	4955
<b>1970</b>	240	165	190	305	360	380	400	400	380	390	375	400	3985
<b>1971</b>	395	340	350	360	340	280	265	295	360	320	315	240	3860
<b>1972</b>	250	175	305	410	490	450	460	500	450	420	335	370	4615
<b>1973</b>	315	365	510	440	510	510	560	530	515	480	365	625	5725
<b>1974</b>	435	520	540	540	550	560	610	700	755	690	650	515	7065
<b>1975</b>	330	300	440	415	470	480	510	540	525	480	345	310	5145
<b>1976</b>	360	195	265	270	280	315	290	400	275	360	110	325	3445
<b>1977</b>	295	315	485	305	375	460	530	570	515	500	420	175	4945
<b>1978</b>	325	340	510	470	490	465	520	570	550	675	435	270	5620
<b>1979</b>	225	175	420	395	460	480	560	510	460	645	455	370	5155
<b>1980</b>	415	440	430	345	330	430	510	700	430	520	290	200	5040
<b>1981</b>	370	320	430	325	365	360	450	580	730	605	360	170	5065
<b>1982</b>	175	250	220	210	185	190	410	485	580	515	520	260	4000
<b>1983</b>	325	195	350	360	510	320	470	350	495	345	390	385	4495
<b>1984</b>	525	480	555	415	570	535	605	570	400	440	430	310	5835
<b>1985</b>	360	350	540	500	570	555	670	695	710	585	595	635	6765
<b>1986</b>	670	530	520	585	610	480	470	605	620	520	330	345	6285
<b>1987</b>	315	230	350	390	365	370	450	430	500	590	490	370	4850
<b>1988</b>	410	380	510	395	360	395	485	495	515	610	510	470	5535
<b>1989</b>	250	330	540	475	420	515	540	475	540	535	415	255	5290
<b>1990</b>	165	325	370	190	335	365	385	475	360	420	350	360	4100
<b>1991</b>	270	450	570	440	410	465	455	610	600	590	495	790	6145
<b>1992</b>	350	430	530	490	475	320	380	420	415	550	380	405	5145
<b>1993</b>	445	370	480	510	410	440	500	600	585	490	470	385	5685

<b>ANO/MÊS</b>	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>	<b>TOTAL</b>
<b>1994</b>	350	435	380	380	450	540	585	575	575	560	390	410	5630
<b>1995</b>	390	260	410	350	500	510	490	625	540	520	535	490	5620
<b>1996</b>	405	485	360	400	475	550	490	470	480	470	395	430	5410
<b>1997</b>	690	685	715	780	675	540	540	625	760	750	790	460	8010
<b>1998</b>	515	395	415	500	480	565	545	555	540	460	500	365	5835
<b>1999</b>	365	360	340	380	480	565	490	565	515	535	400	365	5360
<b>2000</b>	500	535	340	520	565	440	440	500	390	455	285	270	5240
<b>2001</b>	290	360	325	320	205	145	140	142	140	136	222	122	2546,51
<b>2002</b>	67	28	101	125	271	240	445	445	255	342	363	227	2909,723
<b>2003</b>	225	299	388	303	349	311	476	541	491	446	405	346	4579,407
<b>2004</b>	311	218	353	369	380	371	324	466	400	323	427	391	4332,417
<b>2005</b>	657	503	569	482	408	400	444	581	384	487	426	349	5688,8
<b>2006</b>	484	392	511	353	407	518	440	596	629	636	587	424	5975,49
<b>2007</b>	246	468	457	320	312	360	491	539	514	523	465	511	5207
<b>2008</b>	353	255	377	463	469	444	461	510	533	500	402	397	5164,722
<b>2009</b>	547	544	573	555	517	503	551	506	464	503	499	432	6193,034
<b>2010</b>	534	493	528	493	427	487	520	527	546	548	513	596	6211,96
<b>2011</b>	499	379	542	534	382	539	451	509	502	496	543	493	5868,17
<b>Média</b>	367,0	355,2	420,0	401,3	418,3	420,1	457,3	495,8	478,2	477,1	411,3	374,2	

## Anexo C – Aplicação do MGB

### 1 O Modelo de Grandes Bacias – MGB-IPH

O modelo a ser utilizado neste trabalho é o MGB-IPH (COLISCHONN, 2001), que possui a vantagem de incorporar a variabilidade espacial da precipitação em cada intervalo de tempo. Como os processos de geração de escoamento são não lineares, é preferível evitar o uso das médias espaciais das precipitações, que tendem a atenuar os valores extremos.

A vantagem do modelo hidrológico distribuído é a capacidade de separar o escoamento superficial, que vai chegar rapidamente ao reservatório, do escoamento subterrâneo, que chega apenas lentamente, por percolação, aos rios.

O modelo MGB-IPH incorpora informações de características físicas das bacias, como o relevo e os tipos de solos bem como sua localização no espaço. Esse aspecto é particularmente importante em bacias com características variadas, como a presença de regiões com afloramentos rochosos, com alto potencial de geração de escoamento superficial.

O modelo é composto dos seguintes algoritmos: Balanço de água no solo; Evapotranspiração; Escoamentos: superficial, subsuperficial e subterrâneo na célula; Escoamento na rede de drenagem.

#### 1.1 Balanço de água no solo

O balanço hídrico no solo é realizado de maneira independente para cada bloco de uso, utilizando as características e os parâmetros do bloco. A Equação 1.1 descreve o balanço na camada de solo, representado também pela Figura 1.1.

$$W_2 = W + P - T - D_{SUP} - D_{INT} - D_{BAS} + D_{CAP} \quad (\text{Equação 1.1})$$

Sendo:

$W_2$  [mm] é o armazenamento na camada de solo ao final do intervalo de tempo;

$W$  [mm] é o armazenamento na camada de solo ao início do intervalo de tempo;

$P$  [mm] é a precipitação incidente (PI) menos a interceptação (I) ao longo do intervalo de tempo;

$T$  [mm] é a evapotranspiração da água da camada de solo ao longo do intervalo de tempo;

$D_{SUP}$  [mm] é o escoamento superficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem rápida);

$D_{INT}$  [mm] é o escoamento subsuperficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem lenta);

$D_{BAS}$  [mm] escoamento subterrâneo ao longo do intervalo de tempo (drenagem muito lenta);

$D_{CAP}$  [mm] é o fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo. O intervalo de tempo considerado é de um dia.

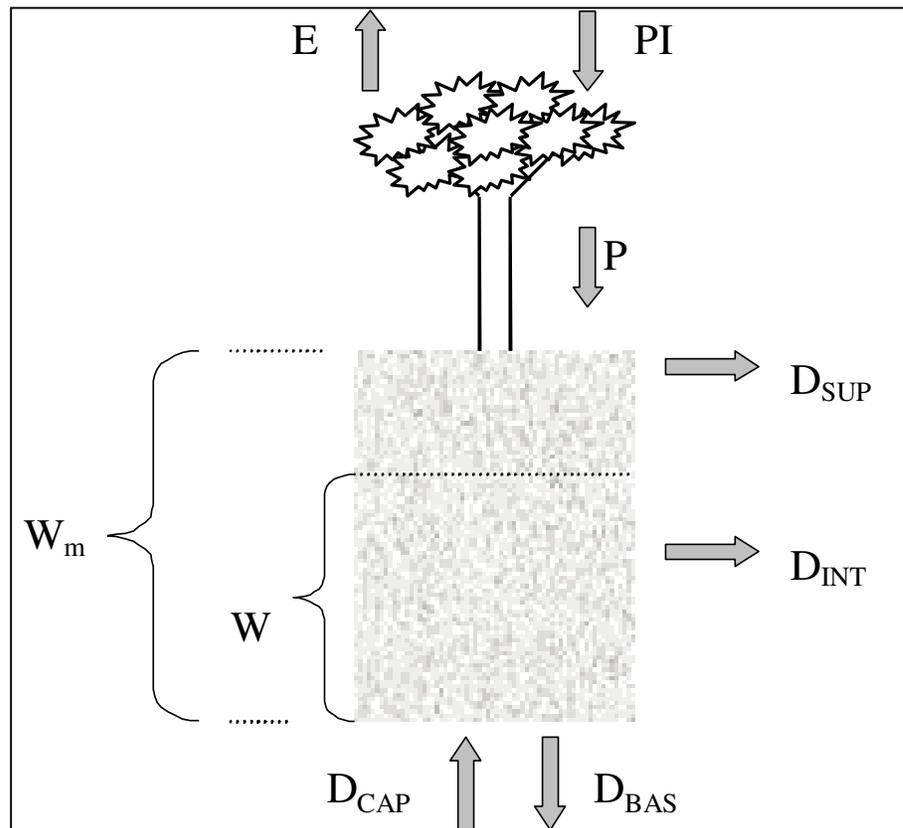


Figura 1.1: Balanço hídrico no solo.

O escoamento superficial, ou direto, é calculado por:

$$D_{\text{SUP}} = P - (W_m - W), \text{ quando } \delta \leq 0 \quad (\text{Equação 1.2})$$

$$D_{\text{SUP}} = P - (W_m - W) + W_m \cdot (\delta)^{b+1}, \text{ quando } \delta > 0 \quad (\text{Equação 1.3})$$

Em que:

$$\delta = \left[ \left( 1 - \frac{W}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(b+1) \cdot W_m} \right] \quad (\text{Equação 1.4})$$

Sendo:

$W$  [mm] é o armazenamento na camada do solo;

$W_m$  [mm] é o armazenamento máximo na camada do solo;

$b$  é um parâmetro adimensional que representa a não-uniformidade da capacidade de armazenamento do solo no bloco;

$P$  [mm] é a precipitação menos a interceptação;

$D_{\text{SUP}}$  [mm] é o escoamento superficial (drenagem rápida).

O escoamento subsuperficial é obtido por uma relação não linear com o armazenamento na camada de solo, baseada na equação da condutividade hidráulica do solo de Brooks e Corey (RAWLS et al., 1993).

$$D_{\text{INT}} = K_{\text{INT}} \cdot \left( \frac{W - W_z}{W_m - W_z} \right)^{\left(3 + \frac{2}{XL}\right)} \quad (\text{Equação 1.5})$$

Nesta relação, tem-se que:

$W_z$  [mm] é o limite de armazenamento para haver escoamento subsuperficial;

$K_{INT}$  [mm] é o parâmetro de escoamento subsuperficial;

$XL$  é o índice de porosidade do solo (parâmetro);

$D_{INT}$  [mm] é o escoamento subsuperficial. O parâmetro  $K_{INT}$  é calibrado e o índice  $XL$  é fixado em 0,4, que é uma média para diferentes tipos de solo (RAWLS et al., 1993).

O escoamento subterrâneo é calculado por uma equação simples, linear em relação ao armazenamento no solo.

$$D_{BAS} = K_{BAS} \cdot \frac{(W - W_c)}{(W_m - W_c)} \quad (\text{Equação 1.6})$$

Sendo:

$W_c$  [mm] é o limite de armazenamento no solo para haver escoamento subterrâneo;

$K_{BAS}$  [mm] é o parâmetro de escoamento subterrâneo;

$D_{BAS}$  [mm] é o escoamento subterrâneo.

Em alguns casos, quando o armazenamento do solo é baixo, pode ocorrer a transferência de água do reservatório subterrâneo para a camada de solo. Essa possibilidade visa permitir ao modelo simular situações em que as águas subterrâneas voltem a ser disponibilizadas para a evapotranspiração. A equação abaixo descreve o fluxo ascendente.

$$D_{cap} = \frac{W_c - W}{W_c} \cdot DM_{cap} \quad (\text{Equação 1.7})$$

Sendo:

$W_c$  [mm] é o limite de armazenamento para haver fluxo ascendente;

$D_{CAP}$  [mm] fluxo ascendente;

$DM_{CAP}$  [mm] máximo fluxo ascendente para o solo (parâmetro do modelo).

## 1.2 Evapotranspiração

O modelo calcula a evaporação e transpiração pela equação de Penman - Monteith, de modo semelhante ao utilizado por Wigmosta et al. (1994). A equação de Penman-Monteith é:

$$e = \left( \frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_W} \quad (\text{Equação 1.8})$$

Sendo:

$e$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] taxa de evaporação da água;

$\lambda$  [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] calor latente de vaporização;

$\Delta$  [ $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ] taxa de variação da pressão de saturação do vapor;

$R_L$  [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ] radiação líquida na superfície;

$G$  [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ] fluxo de energia para o solo;

$\rho_A$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] massa específica do ar;

$\rho_W$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] massa específica da água;

$c_p$  [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ] calor específico do ar úmido;

$e_s$  [ $\text{kPa}$ ] pressão de saturação do vapor;

$e_d$  [ $\text{kPa}$ ] pressão do vapor;

$\gamma$  [ $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ] constante psicrométrica;

$r_s$  [ $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ] resistência superficial da vegetação;

$r_a$  [ $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ] resistência aerodinâmica.

A interceptação é considerada dependente da cobertura do solo, expressa pelo índice de área foliar (IAF) da vegetação.

$$S_{IL} = F_i \cdot IAF \quad (\text{Equação 1.9})$$

Sendo:

$S_{IL}$  [mm] é a capacidade do reservatório de interceptação;

IAF é o índice de área foliar (adimensional);

$F_i$  [mm] é o parâmetro de lâmina máxima de interceptação. O valor de  $F_i$  é fixado em 0,2 mm, conforme Wigmosta et al. (1994).

A transpiração é calculada considerando os valores de resistência superficial e resistência aerodinâmica adequados para o tipo de cobertura vegetal. A resistência superficial depende da disponibilidade de água no solo. Em condições favoráveis, os valores de resistência superficial são mínimos.

$$r_{su} = F_4 \cdot r_s \quad (\text{Equação 1.10})$$

Sendo que:

$$\frac{1}{F_4} = \frac{W - W_{PM}}{W_L - W_{PM}} \quad (\text{Equação 1.11})$$

Para:  $W = WL$

Sendo:

$r_{su}$  [ $s \cdot m^{-1}$ ] é a resistência superficial considerando a umidade do solo;

$r_s$  [ $s \cdot m^{-1}$ ] é a resistência superficial em boas condições de umidade do solo;

$F_4$  é um coeficiente de ajuste da resistência superficial;

$W$  [mm] é o armazenamento do solo;

$W_{PM}$  [mm] é o armazenamento do solo no ponto de murcha;

$W_L$  [mm] é o armazenamento em que inicia o efeito sobre a resistência superficial. Conforme Shuttleworth (1993), os valores de  $W_L$  e  $W_{PM}$  são fixados em 50% e 10% de  $W_m$ , respectivamente, e não são considerados na calibração.

### 1.3 Escoamentos: superficial, subsuperficial e subterrâneo

Cada um dos reservatórios é representado matematicamente por uma equação de reservatório linear simples. A soma dos valores de  $Q_{SUP}$ ,  $Q_{INT}$  e  $Q_{BAS}$  é o escoamento da célula.

$$Q_{SUP} = \frac{1}{TK_S} \cdot V_{SUP} \quad (\text{Equação 1.12})$$

$$Q_{INT} = \frac{1}{TK_I} \cdot V_{INT} \quad (\text{Equação 1.13})$$

$$Q_{INT} = \frac{1}{TK_I} \cdot V_{INT} \quad (\text{Equação 1.14})$$

Sendo:

$Q_{SUP}$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] é a vazão de saída do reservatório superficial;

$Q_{INT}$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] é a vazão de saída do reservatório subsuperficial;

$Q_{BAS}$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] é a vazão de saída do reservatório subterrâneo;

$V_{SUP}$  [ $m^3$ ] é o volume no reservatório superficial;

$V_{INT}$  [ $m^3$ ] é o volume no reservatório subsuperficial;

$V_{BAS}$  [ $m^3$ ] é o volume no reservatório subterrâneo;

$TK_S$  [s] parâmetro de retardo do reservatório superficial;

$TK_I$  [s] parâmetro de retardo do reservatório subsuperficial;

$TK_B$  [s] parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo.

O valor do parâmetro  $TK_B$  pode ser obtido analisando os períodos de recessão do hidrograma e em alguns locais da bacia. A Equação 1.13 Equação 1.14 mostram como é obtido o valor de  $TK_B$  a partir de dados observados.

$$TK_B = C_B \cdot 86400 \quad (\text{Equação 1.15})$$

$$C_B = \frac{ND}{\ln\left(\frac{Q_{ND}}{Q_0}\right)} \quad (\text{Equação 1.16})$$

Sendo:

$C_B$  [dias] é o parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo;

$N_D$  é o número de dias do período de recessão do hidrograma;

$Q_0$  é a vazão no início da recessão;

$Q_{ND}$  é a vazão no final da recessão.

O tempo de retardo característico é obtido pela equação de Kirpich, utilizando a diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo do MNT encontrados dentro da célula do modelo considerada.

$$TK_S = C_S \cdot T_{ind} \quad (\text{Equação 1.17})$$

$$TK_I = C_I \cdot T_{ind} \quad (\text{Equação 1.18})$$

Sendo:

$T_{ind}$  [s] é o tempo de retardo característico da célula;

$C_S$  é um parâmetro adimensional para calibração do escoamento superficial;

$C_I$  é um parâmetro adimensional para calibração do escoamento subsuperficial.

$$T_{ind} = 3600 \cdot \left(0,868 \cdot \frac{L^3}{\Delta H}\right)^{0,385} \quad (\text{Equação 1.19})$$

Sendo:

$L$  [km] é a largura da célula;

$\Delta H$  [m] é a diferença de altura entre o extremo mais alto e o mais baixo da célula.

## 1.4 Escoamento na rede de drenagem

O modelo realiza a propagação nos trechos de rio utilizando o método de Muskingum-Cunge (TUCCI, 1998), que relaciona a vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo qualquer às vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e à vazão de entrada no intervalo atual.

## 1.5 Calibração dos parâmetros

A calibração de um modelo hidrológico distribuído é, muitas vezes, citada como a etapa mais trabalhosa da utilização de um modelo deste tipo. Entretanto, ao longo das experiências anteriores no uso do modelo MGB-IPH, foi desenvolvida uma eficiente metodologia de calibração baseada em dois pontos principais:

- 1) relação direta entre os parâmetros e as classes de solos e de vegetação identificadas em mapas e imagens de satélite (COLLISCHONN, 2001);
- 2) otimização dos parâmetros para cada classe utilizando um programa computacional baseado em algoritmos genéticos (YAPO et al., 1998; COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN e TUCCI, 2003).

O algoritmo de otimização utilizado para a calibração dos parâmetros é o algoritmo MOCOM-UA, desenvolvido na Universidade do Arizona (YAPO et al., 1998). Trata-se de um algoritmo de otimização multiobjetivo que permite calibrar o modelo considerando diferentes aspectos do ajuste entre hidrogramas observado e calculado (COLLISCHONN e TUCCI, 2003). Tipicamente, são utilizadas duas ou três funções objetivo, como o coeficiente de Nash Sutcliffe e os erros relativos de volumes calculados.

## 2 Metodologia

A metodologia empregada nesta parte do trabalho se divide entre as etapas de geração e obtenção dos dados de entrada, utilização e calibração do modelo e análise dos resultados. Um breve resumo das etapas encontra-se na Figura 2.1.

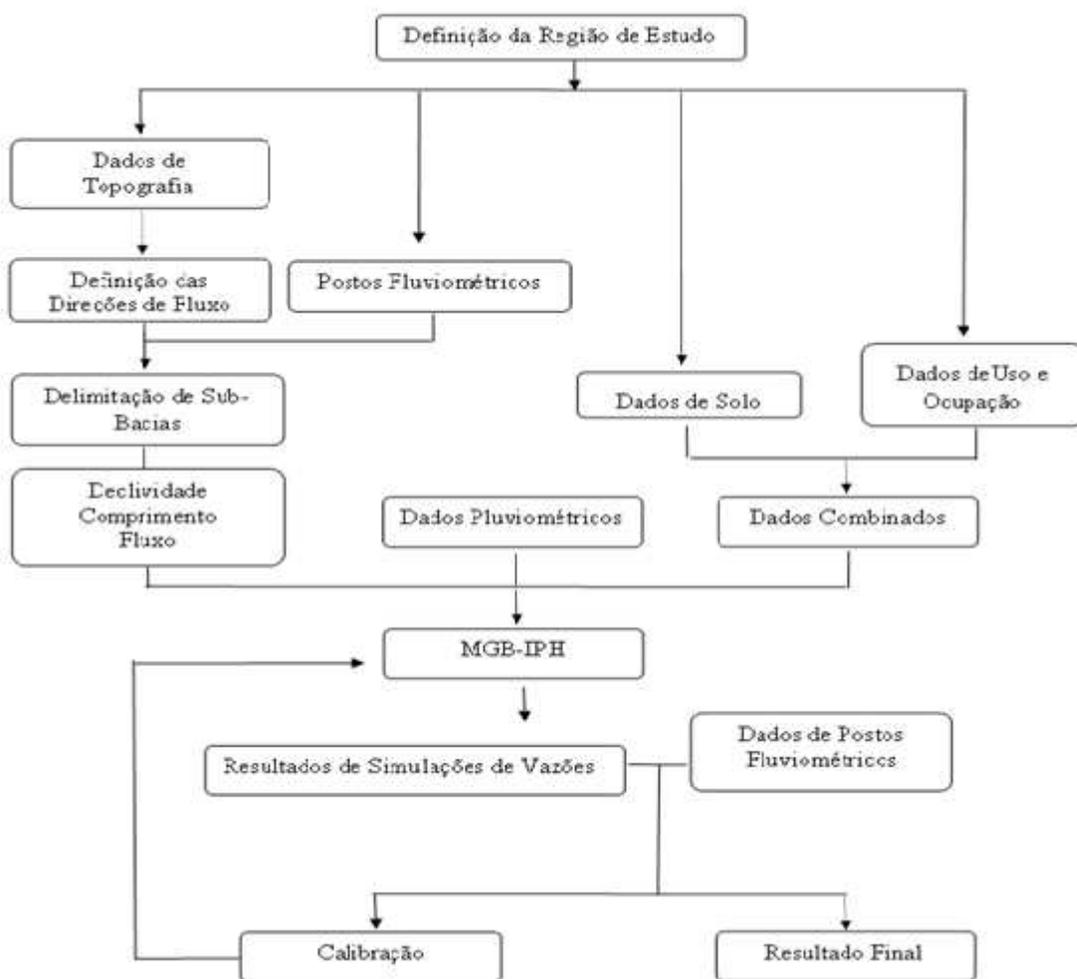


Figura 2.1: Fluxograma de trabalho.

## 2.1 Dados de entrada

Previamente à efetiva utilização do modelo, há a necessidade de geração de mapas da região de trabalho como, por exemplo, mapas de alta e baixa resolução espacial do relevo da região de estudo, drenagem da bacia e comprimento do rio.

Estes mapas são gerados pelas rotinas MGB-GIS com mapas de relevo SRTM, disponíveis para quase todo o Brasil no site da Embrapa (<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>) com resolução de, aproximadamente, 90x90m.

Há ainda a necessidade da obtenção de mapas de solos e cobertura vegetal da região, sendo o primeiro obtido por meio do sítio do Instituto de Geociências Aplicadas (<http://www.iga.com.br>), e o segundo obtido por meio de classificação supervisionada de fotos de satélite com diferentes bandas de captação realizadas por Collischonn et al. (2007).

A execução dessa metodologia descrita tem por finalidade fornecer o que é necessário ao modelo para calcular o balanço hidrológico dentro de cada pixel e assim estimar escoamentos superficiais responsáveis pela geração de vazão na calha.

## 2.2 Delimitação da região de estudo

Foi definida para este estudo a região da represa de Furnas, e toda sua bacia hidrográfica contribuinte. Os mapas disponíveis referentes a esta localização são SE-23-Y-C, SE-23-Y-D, SE-23-Z-D, SE-24-Y-C, SF-23-V-A, SF-23-V-B, SF-23-X-A, SF-23-X-B, SF-24-V-A, SF-23-V-C, SF-23-V-D, SF-23-X-C, SF-23-X-D, SF-23-Y-A, SF-23-Y-B, SF-23-Z-A e SF-23-Z-B, sendo estes códigos utilizados pelas cartas SRTM no site da EMBRAPA e pelo IBGE em suas cartas.

Os mapas citados foram unidos utilizando-se do *software* Idrisi Kilimanjaro e a partir deles foi traçada a área de drenagem da usina de Furnas. Definido seu espaço necessário foi retirada uma janela

para os estudos, entre as latitudes 22°56'S e 20,17°S e longitudes 46°43'O e 43°31'O, que permite a visualização topográfica de toda a área de interesse.

### 2.3 Geração de mapas de alta e baixa resolução

Foi retrabalhado, com a utilização do *software* Idrisi Kilimanjaro, o mapa da missão SRTM para a obtenção de um mapa com resolução de 100x100 m, sendo este de alta resolução, e um de 5x5 km, utilizado como mapa de baixa resolução. Os mapas de alta e baixa resolução encontram-se apresentados na Figura 3.1, no item Resultados.

### 2.4 Utilização das Rotinas MGB-GIS

O primeiro passo é a geração da rede de drenagem de alta resolução, realizada por uma rotina que atribui a cada pixel da imagem de alta resolução um valor de referência que indica para qual pixel vizinho seu escoamento se dá. O resultado dessa rotina não é uma imagem possível de visualização, sendo retrabalhado posteriormente para adquirir um formato mais claro.

Após o resultado de direção de drenagem, outra rotina é capaz de gerar a área acumulada da bacia hidrográfica montante a cada pixel. Um exemplo desse resultado encontra-se na Figura 2.2, sendo que quanto mais escura a tonalidade da cor azul, maior a área de drenagem montante.

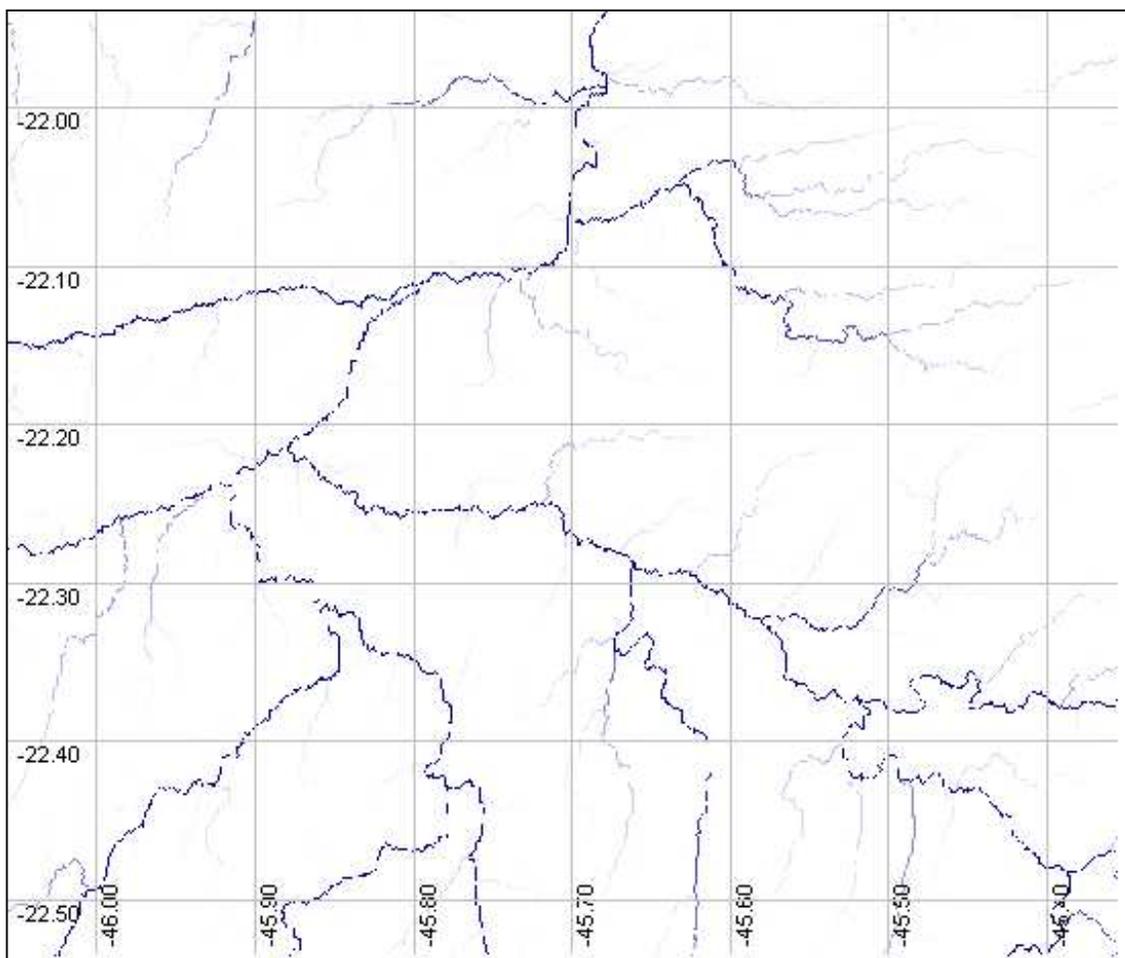


Figura 2.2: Exemplo da rede de drenagem de alta resolução da parte sul da bacia hidrográfica.

Este resultado serve como referência para as rotinas seguintes na geração da drenagem de baixa resolução, obtido a partir da combinação do mapa topográfico de baixa resolução e o mapa de direções de fluxo de alta resolução, novamente sem uma visualização clara do resultado. A rotina que segue é responsável pela geração da visualização vetorial do mapa gerado (Figura 2.3). Apesar da boa aproximação realizada pela rotina, existem células que necessitam de correção, pois células com direções incorretas podem apresentar distorções em relação à drenagem natural local, interligando sub-bacias e, conseqüentemente, gerando erros em cadeia, principalmente nos cálculos de comprimento do rio e área de drenagem.

O primeiro mapa gerado pela rotina apresentou grande erro nas proximidades do reservatório de Furnas. Na Figura 2.3, será possível observar o rio Grande saindo da bacia de Furnas, seguindo em

direção ao São Francisco, quando deveria dirigir-se ao barramento. Este erro é comum especialmente em regiões planas, como lagos, pois o modelo assimila uma direção aleatória para o fluxo quando não há clara distinção de cotas.

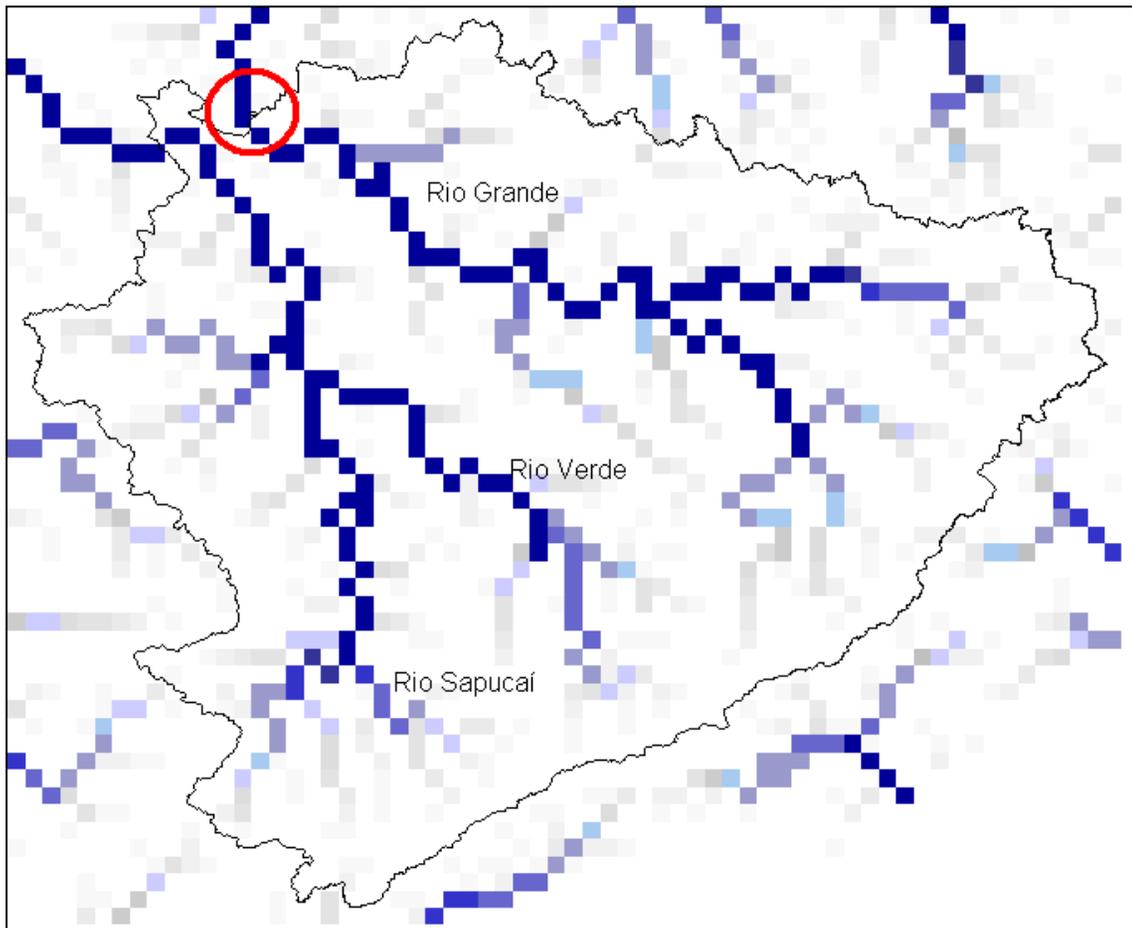


Figura 2.3: Mapa de direções de fluxo com erros.

Estas correções são realizadas de forma manual, e pode-se utilizar, para facilitar esta correção, uma sobreposição da imagem de relevo de alta resolução com o mapa vetorial de drenagem e também a rede hidrográfica conhecida (Figura 2.4).

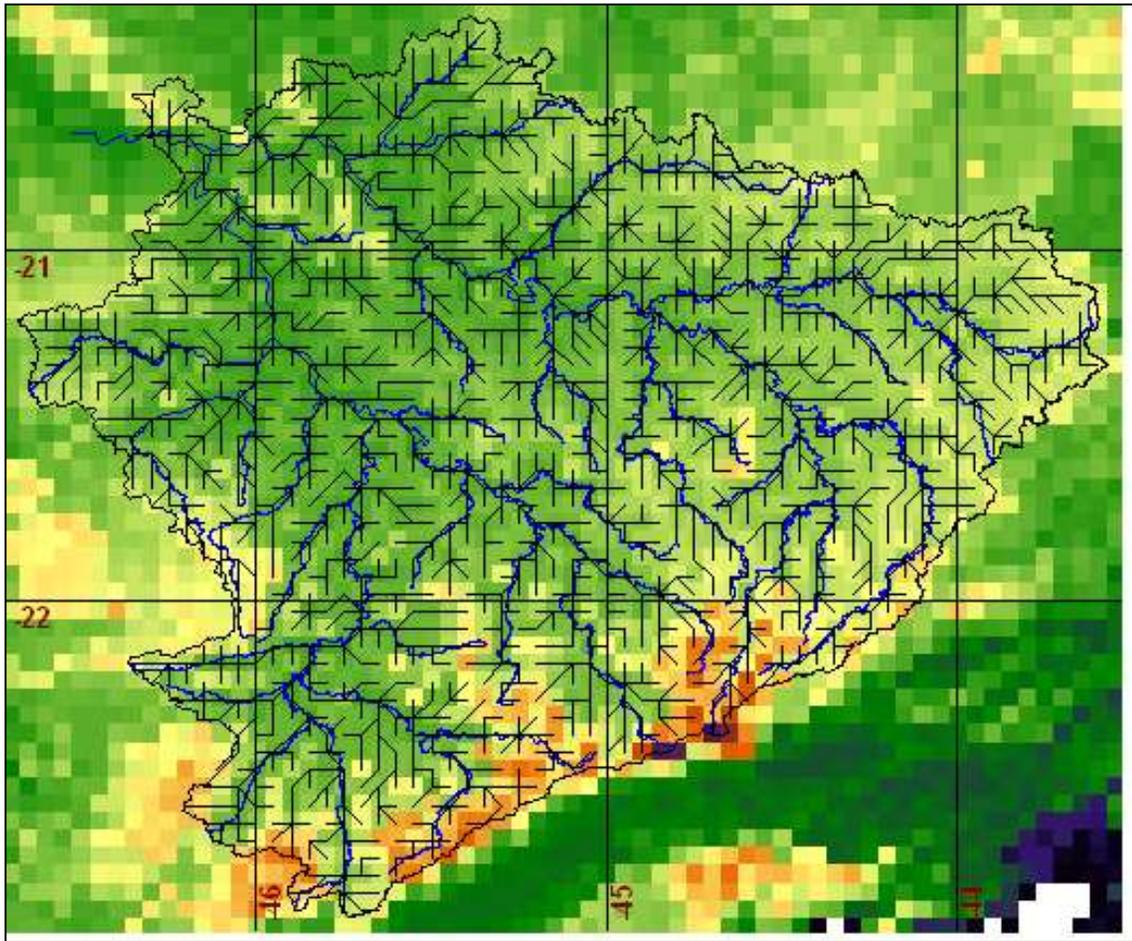


Figura 2.4: Sobreposição da drenagem vetorial com as imagens de relevo e hidrografia local.

Essas correções demandam grande tempo, pois todas as células de rios e afluentes devem ser verificadas e corrigidas. Após as correções gera-se novamente um mapa vetorial e este também deve ser verificado e corrigido, e segue neste passo até a completa correção da imagem. A Figura 2.5 mostrará a drenagem corrigida para a bacia de Furnas, na forma de área acumulada para melhor visualização.

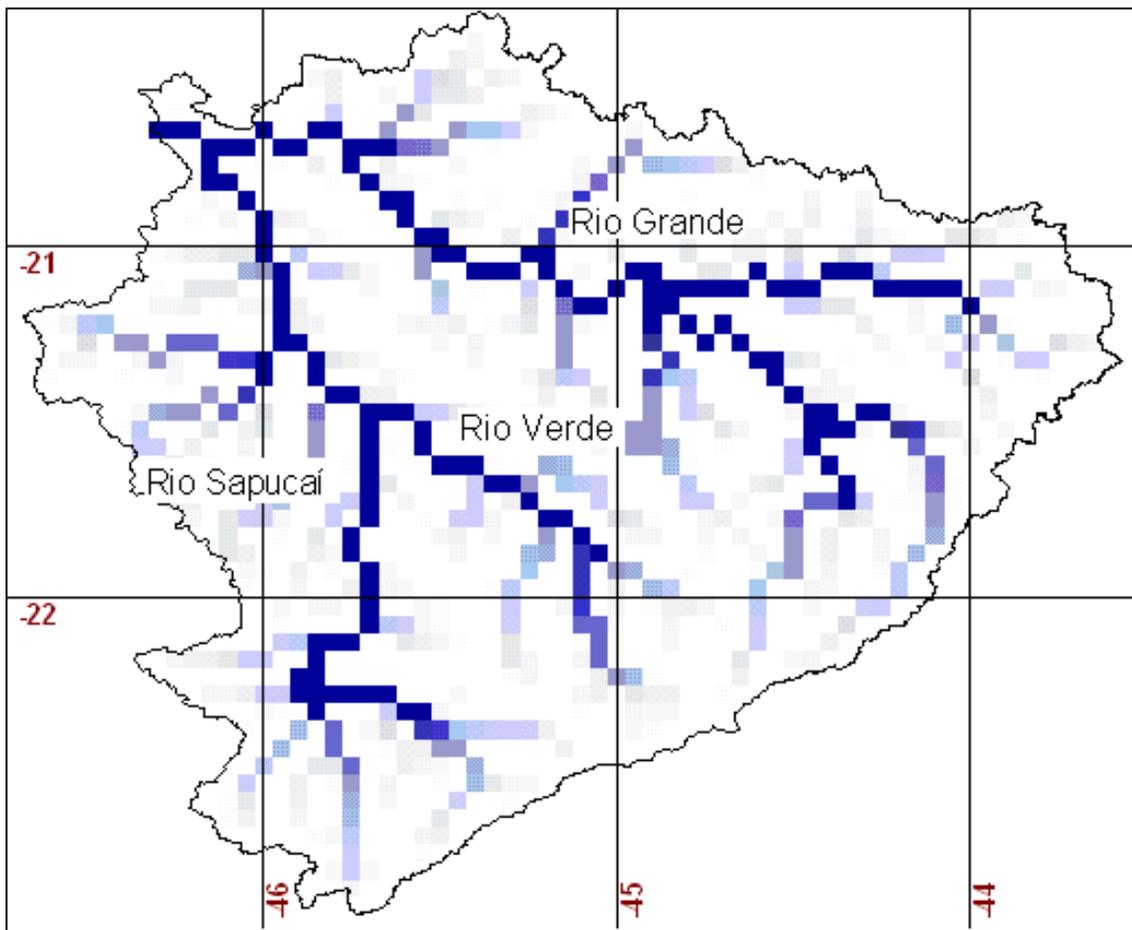


Figura 2.5: Direções de fluxo corrigidas.

Com esses resultados, mais rotinas podem ser executadas para calcular a declividade, a área de drenagem e o comprimento do rio em cada um destes pixels. Esses resultados serão utilizados posteriormente para a rotina MGB-IPH.

Em uma última etapa, a bacia foi dividida em sub-bacias para que a calibração do modelo se dê em áreas menores, priorizando a precisão e a possibilidade de observar variações nos parâmetros de ajuste entre sub-bacias. A divisão foi estabelecida pela existência de postos fluviométricos, Figura 2.6, com séries de dados consistentes, sendo eles o exutório de cada sub-bacia. Nesta etapa houve novamente uma verificação da direção de fluxo das células, pois a área de cada sub-bacia deveria estar próxima àquela informada para os postos fluviométricos pela ANA.

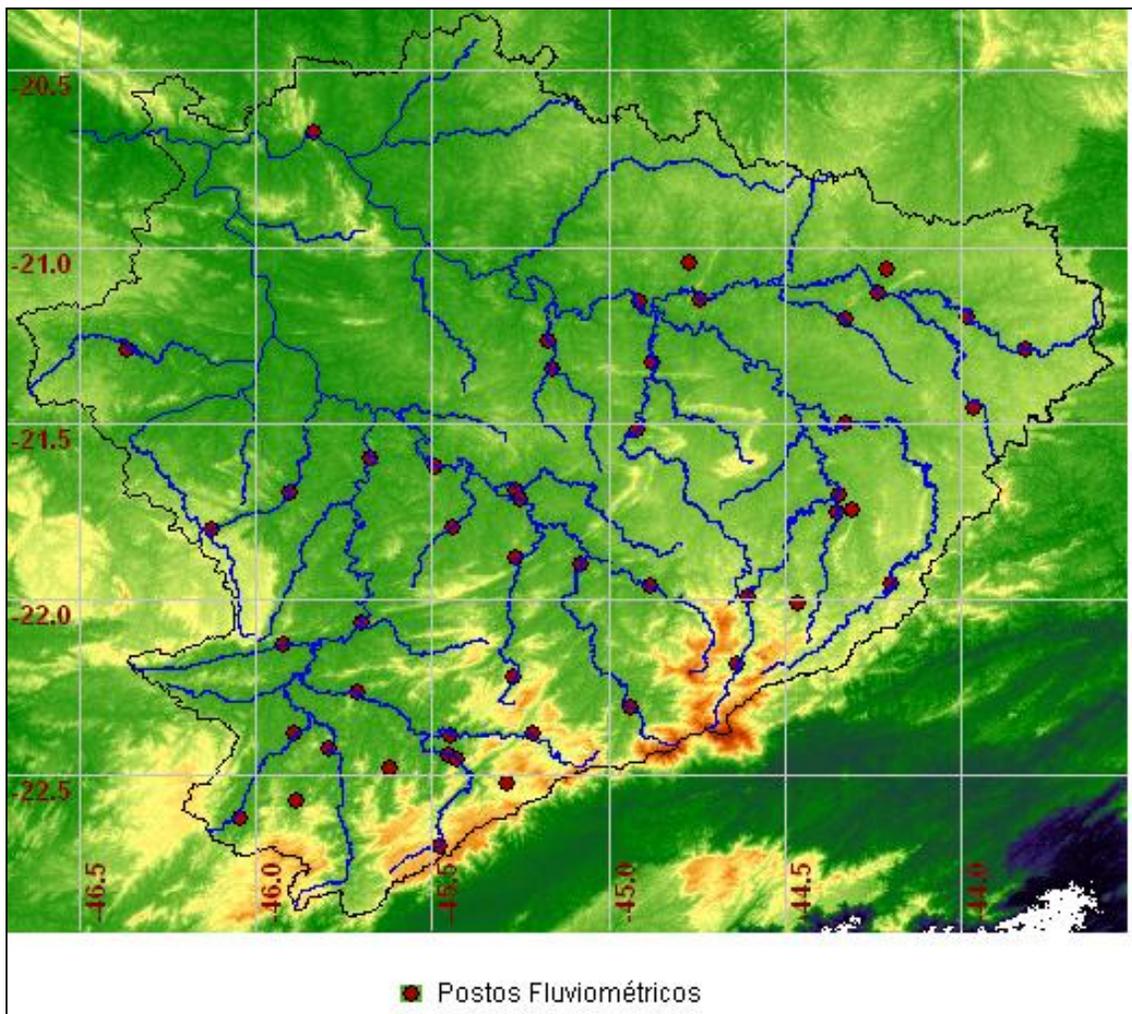


Figura 2.6. Postos fluviométricos da bacia de Furnas.

## 2.5 Definição da precipitação nas células

No sítio da HidroWeb (<http://hidroweb.ana.gov.br>) é possível encontrar um mapa com a localização dos postos pluviométricos para qualquer região do país. O mapa para a região em estudo foi observado e os postos locados nas imagens deste estudo (Figura 2.7).

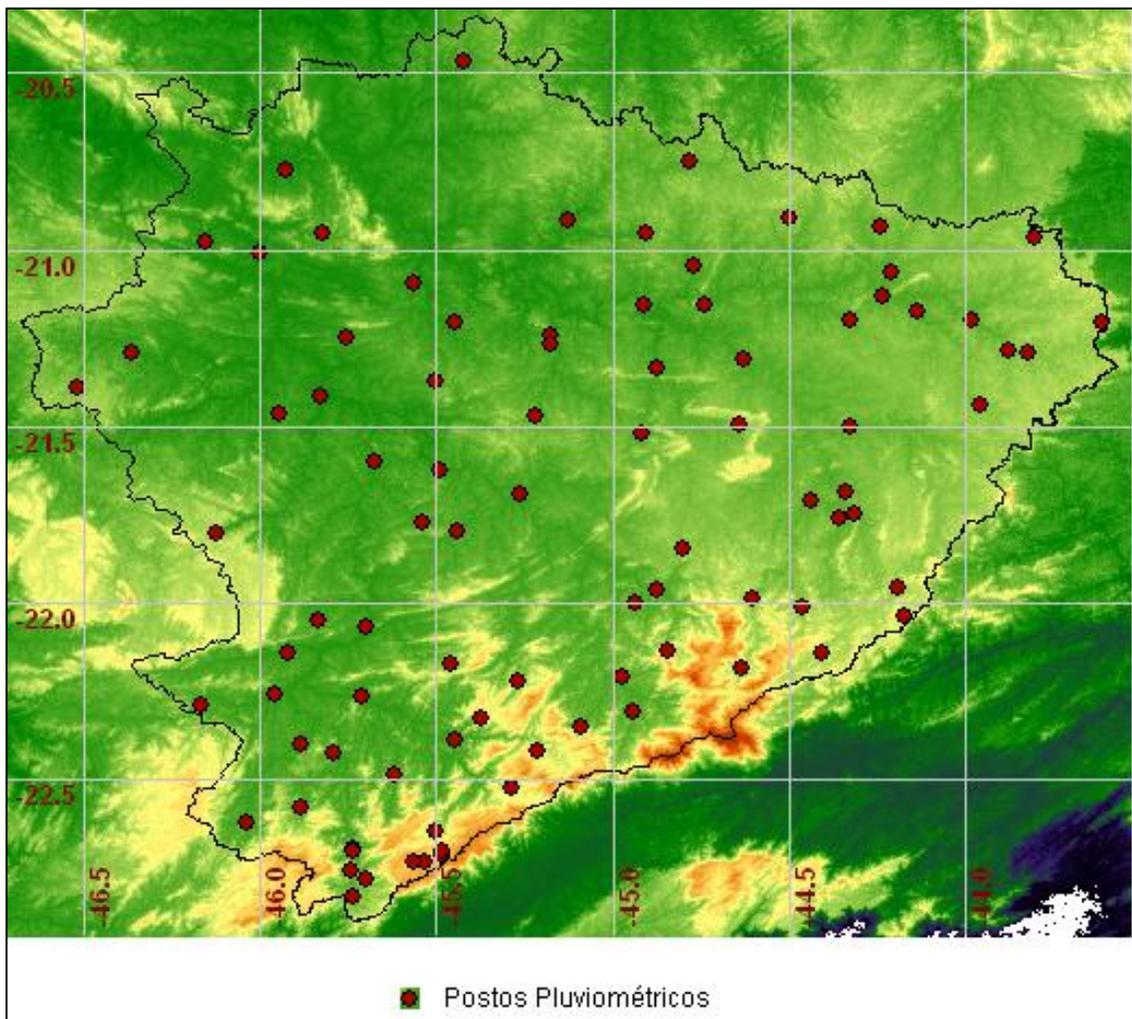


Figura 2.7: Postos pluviométricos na bacia de Furnas.

Como as séries de vazões são, geralmente, menores que as de chuva, os postos de vazões dessa bacia foram utilizados, prioritariamente, para se determinar qual o intervalo de tempo poderia ser utilizado para os estudos.

A Figura 2.8 mostra um resumo da quantidade de dados dos postos pluviométricos da bacia de Furnas, onde os sinalizados com a cor verde são os que possuem quantidade suficiente de dados consistidos, os amarelos e os vermelhos são os que não poderão ser utilizados.

Quantidade de Falhas Anuais nos postos Fluviométricos da Bacia do Rio Grande									
Codigo	1920 - 1929	1930 - 1939	1940 - 1949	1950 - 1959	1960 - 1969	1970 - 1979	1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2005
61003000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61012000	1	0	0	0	0	0	0	0	0
61014000	5	2	0	0	0	0	0	0	2
61024000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61031000	4	2	5	1	2	2	0	0	3
61045000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61052000	0	0	2	5	0	1	2	0	0
61060000	1	0	0	0	0	0	0	0	0
61075000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61078000	3	0	0	0	0	0	0	0	0
61085000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61090000	0	0	2	2	0	0	0	0	0
61100000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61107000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61115000	0	0	1	1	0	0	0	0	0
61122000	0	0	0	1	0	0	0	0	0
61135000	0	1	0	3	0	0	0	0	0
61140000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61145000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61173000	2	0	1	1	2	0	0	0	0
61175000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
61230000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61250000	2	0	0	0	0	0	0	0	0
61267000	1	0	0	2	1	0	0	0	0
61271000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61272000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61280000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61285000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61295000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
61305000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61343000	2	1	1	1	1	0	0	0	0
61350000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61360000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61370000	2	0	0	0	0	0	0	0	0
61390000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
61410000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61429000	5	0	0	0	0	0	0	0	0
61460000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61473000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61484000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61500000	2	0	0	0	0	0	0	0	0
61510000	5	0	0	0	0	0	0	0	0
61520000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
61530000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61537000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61555000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61568000	2	0	0	0	0	0	0	0	0
61610000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61665000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61879000	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 2.8: Resumo de falhas nos postos fluviométricos da bacia de Furnas.

Observando este resumo das falhas dos postos fluviométricos, decidiu-se por utilizar dados pluviométricos e fluviométricos de 1968 a 1990. Portanto, os dados foram restritos à data determinada, e outra rotina gera os dados de chuva, por interpolação, na seguinte sequência:

- 1 – Para cada dia, é observado qual o posto pluviométrico que possui dados mais próximos à célula que está sendo estudada;
- 2 – Determina-se uma circunferência ao redor da célula com raio de cinco vezes a distância dos postos mais próximos com dados;
- 3 – Todos os postos dentro desta circunferência são utilizados para a geração da precipitação na célula, através de uma média ponderada pelo inverso do quadrado da distância.

## 2.6 Dados de Solo e de Uso e Ocupação

Foram obtidos do Instituto de Geociências aplicadas (IGA – <http://www.iga.br>), dados relativos ao solo do estado de Minas Gerais, e estes foram delimitados para a área de estudo, gerando a Figura 2.9.

O conhecimento de solo pelo modelo visa, principalmente, estimar a capacidade de infiltração de cada um, fazendo a estipulação da proporção de escoamento superficial e infiltração em cada célula estudada.

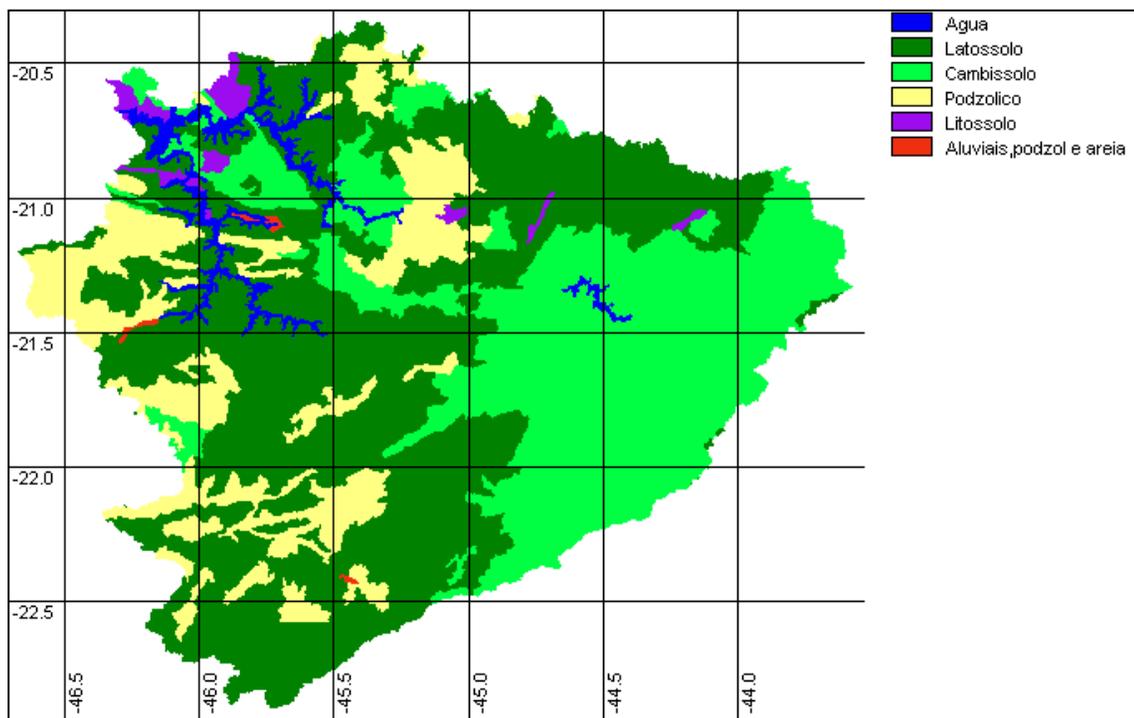


Figura 2.9: Solos da bacia de Furnas.

Para uso e ocupação, foi utilizada a classificação supervisionada realizada por Collischonn et al. (2007), em que foi realizada uma separação entre água, pastagem e solo exposto, agricultura e mata (Figura 2.10).

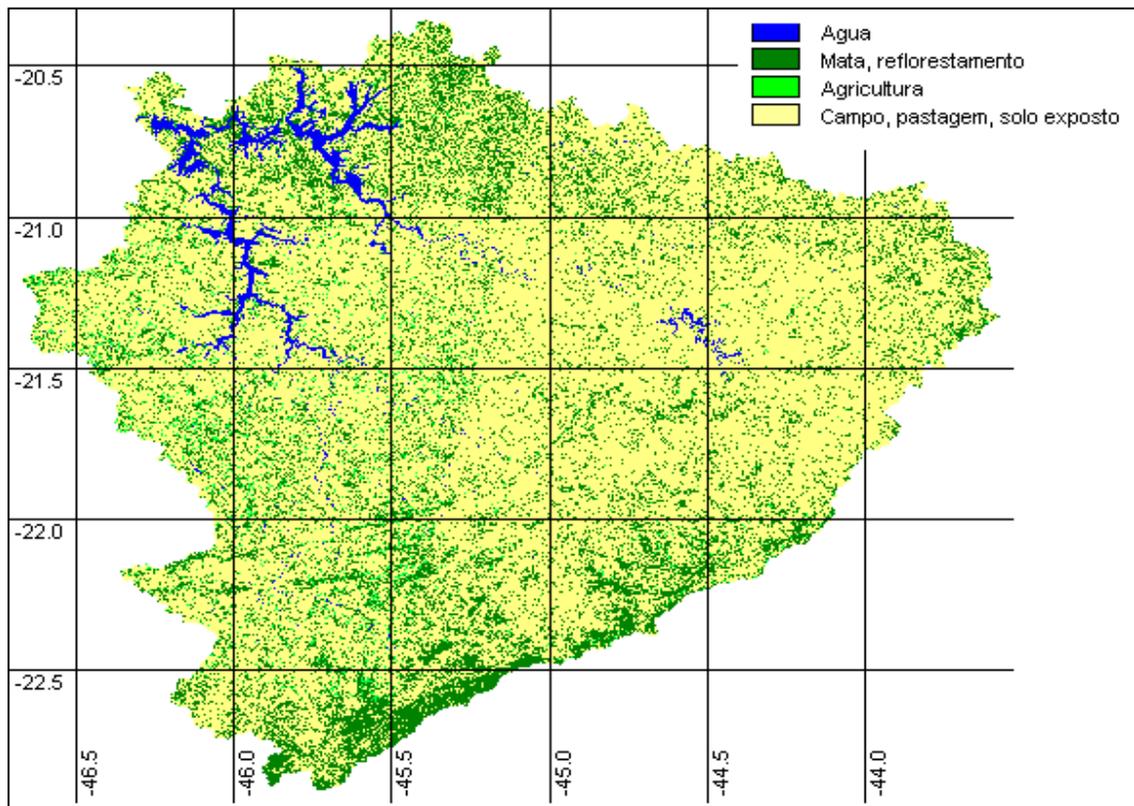


Figura 2.10: Uso e ocupação do solo na bacia de Furnas (COLLISCHONN, 2007).

O mapa de tipo de solo foi resumido para apenas três tipos de solos, de acordo com as características, segundo:

- Solo com alta capacidade de infiltração: Neste critério se enquadrou o solo do tipo latossolo.
- Solo com média capacidade de infiltração: Foram incluídos neste tipo os solos do tipo cambissolo, podzólico, aluviais, podzol e areia.
- Solo com baixa capacidade de infiltração: Apenas o solo litossolo foi incluído nesta classificação.

Após realizar esta reclassificação dos tipos de solo foi gerada uma única imagem, Figura 3.6, contemplando os mapas de solo e uso e ocupação, com blocos pré-determinados reconhecidos pelo modelo. São eles:

- 1 – Pastagem/Campo/Agricultura/Solo Exposto + Solo de média capacidade de infiltração;

- 2 – Agricultura/Mata + Solo de alta capacidade de infiltração;
- 3 – Todas coberturas com solos de baixa capacidade de infiltração;
- 4 – Mata + Solo de média capacidade de infiltração;
- 5 – Pastagem/Solo Exposto + Solo de alta capacidade de infiltração;
- 6 – Água.

## 2.7 Utilização e calibração do modelo

Utilizando-se dos dados obtidos anteriormente, é possível executar o modelo MGB-IPH, para uma primeira estimativa do resultado de vazões em uma simulação e calibrar os parâmetros necessários.

Deve-se definir o intervalo de tempo dos dados utilizados para calibração e o intervalo de tempo para verificação. O intervalo de 1968 a 1990 pré-definido foi dividido em duas séries. A primeira engloba os anos de 1968 a 1980, utilizados para calibração, e a outra de 1981 a 1999, utilizados para a validação da calibração realizada.

Inicialmente foi realizada uma calibração manual dos parâmetros, depois feito um ajuste fino por uma rotina. Os parâmetros para verificação da qualidade da calibração são: erro de volume ( $\Delta V$ ), coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e também o coeficiente logaritmo deste último (NSlog).

$$\Delta V = \frac{\Sigma Q_{calc}(t) - \Sigma Q_{obs}(t)}{\Sigma Q_{obs}(t)} \quad \text{(Equação 2.1)}$$

$$NS = 1 - \frac{\Sigma [Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t)]^2}{\Sigma [Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}}]^2} \quad \text{(Equação 2.2)}$$

$$NS \log = 1 - \frac{\Sigma [\log Q_{obs}(t) - \log Q_{calc}(t)]^2}{\Sigma [\log Q_{obs}(t) - \log \overline{Q_{obs}}]^2} \quad \text{(Equação 2.3)}$$

Sendo:

$Q_{calc}$  – Vazão calculada pelo método em determinado t, em  $m^3/s$ ;

$Q_{obs}$  – Vazão observada em postos fluviométricos em t, em  $m^3/s$ ;

$\overline{Q_{obs}}$  - Vazão média observada, em  $m^3/s$ .

O coeficiente de NS representa a proximidade dos hidrogramas gerados com as leituras nos postos fluviométricos, especialmente nos picos de vazão. O coeficiente logaritmo de NS se assemelha ao último, porém com especial atenção às baixas vazões. O erro de volume é calculado pela diferença de áreas sobre os hidrogramas. Todos os três índices são expressos em percentuais.

Lembrando que esses ajustes devem ser realizados para cada sub-bacia definida e devem ser realizados de montante para jusante, ou seja, sempre que uma bacia vá ser calibrada, todas as suas contribuintes já devem estar.

## 2.8 Análise dos resultados

Realizada a calibração do modelo em um período de tempo determinado, deve-se utilizar de dados pluviométricos distintos, em outros períodos de tempo, da mesma bacia e verificar os resultados da simulação com os observados em leituras de postos fluviométricos.

Essa análise pode ser feita visualmente por meio de hidrogramas e verificar a compatibilidade entre as curvas geradas. Caso haja necessidade, o processo de calibração deve ser reiniciado até se obter um resultado satisfatório para as simulações de vazões.

### 3 Resultados

Após a elaboração e ajuste dos mapas, apresentados no capítulo de metodologia, foram obtidos os últimos dados necessários às simulações, sendo eles blocos de uso/tipo de solo, dados de vazões, de chuva e parâmetros iniciais para modelagem.

#### 3.1 Mapas

##### 3.1.1 Bacia Hidrográfica

Conforme descrito, as imagens 10a e 10b referem-se aos mapas de relevo de alta e baixa resolução, respectivamente, para a bacia hidrográfica em estudo. As cores refletem a elevação do terreno, na ordem de azul escuro, verde, amarelo, laranja, vermelho e roxo, das cotas menores para as maiores.

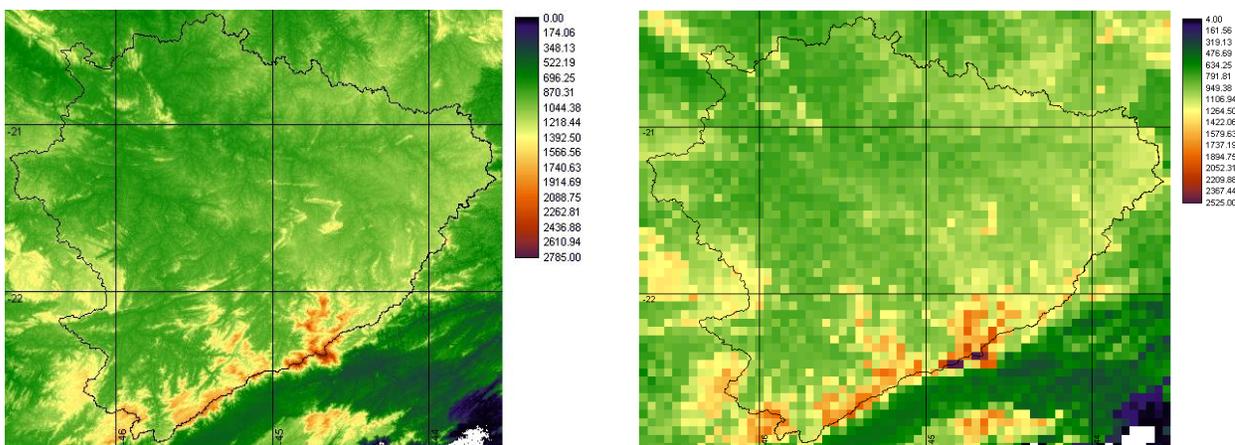


Figura 3.1: Imagens de alta e baixa resolução da topografia da bacia hidrográfica de Furnas, com seu traçado.

### 3.1.2 Direções de fluxo

A Figura 3.2 expõe o erro na geração da direção de fluxo pelo modelo, em especial a parte circulada em vermelho. É importante destacar que este erro ocorreu em uma parte plana, onde o modelo atribui aleatoriamente uma direção na tentativa de estimar a direção correta.

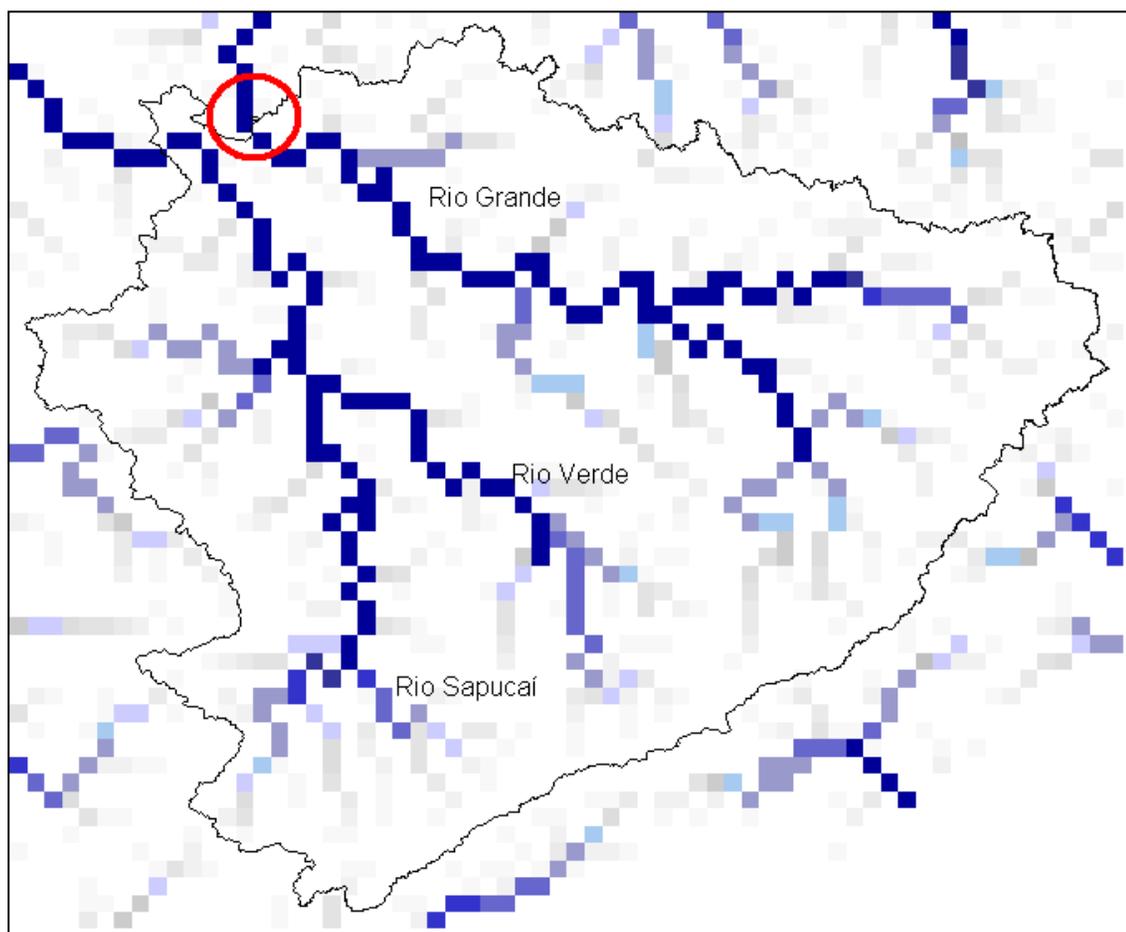


Figura 3.2: Mapa de direções de fluxo com erros.

A Figura 3.3 mostra um exemplo de sobreposição para a realização das correções manuais das direções de fluxo, buscando maior semelhança com a rede de drenagem real.

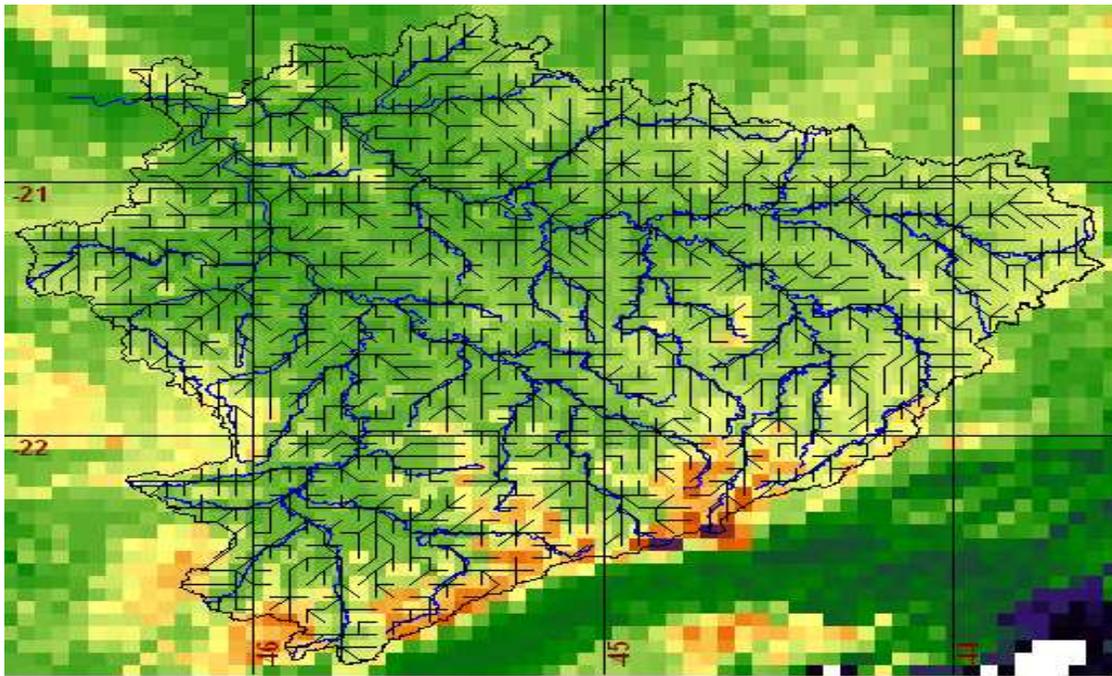


Figura 3.3: Sobreposição da drenagem vetorial com as imagens de relevo e hidrografia local.

Finalmente, após as devidas correções nas direções de fluxo, obtém-se um resultado como o que se demonstra na Figura 3.4.

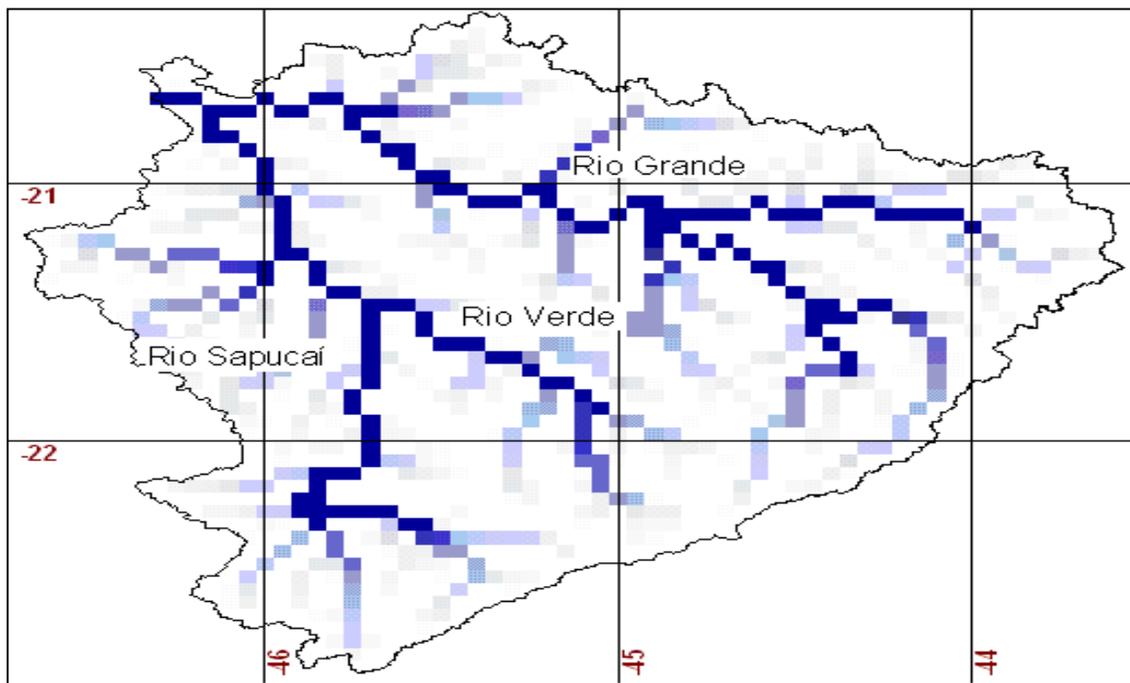


Figura 3.4: Direções de fluxo corrigidas.

### 3.1.3 Mapa de sub-bacias

O mapa indicado pela Figura 3.5 expõe as sub-bacias utilizadas na calibração e utilização do modelo, recebendo o mesmo nome de seu posto fluviométrico exutório.

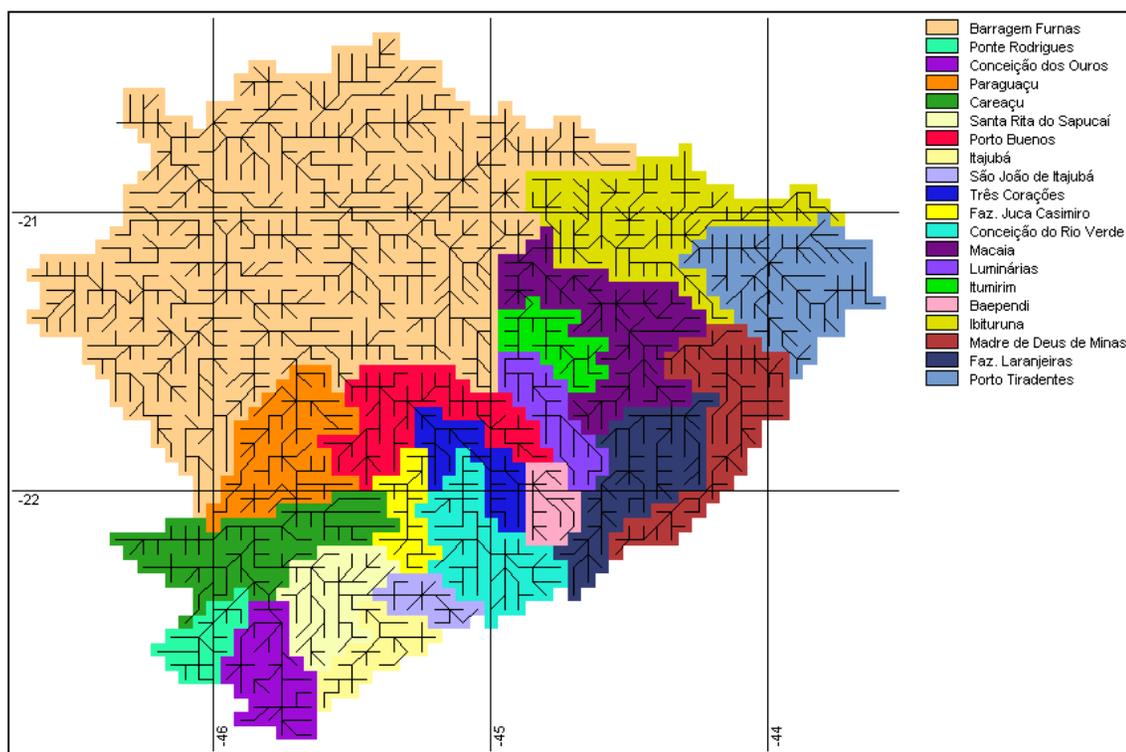


Figura 3.5: Sub-bacias definidas para a calibração do modelo.

### 3.1.4 Blocos de Uso e Tipo de Solo

Utilizando os mapas de solo e uso e ocupação (Figura 2.9 e Figura 2.10), foi gerado, por sua sobreposição, o mapa de blocos de uso e tipo de solo (Figura 3.6).

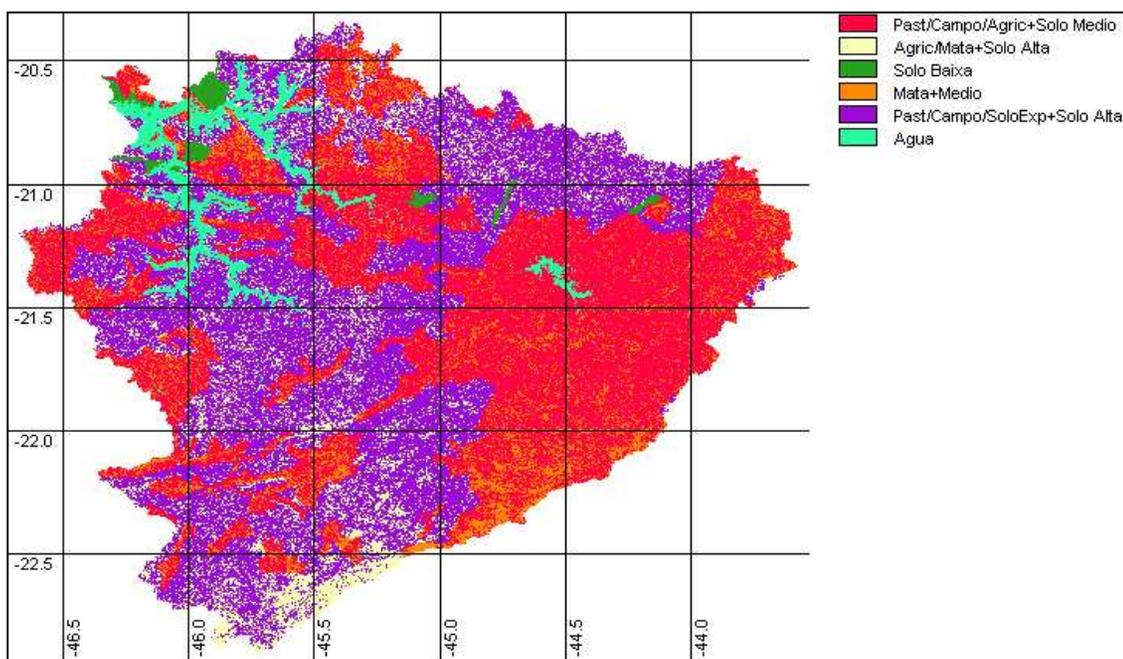


Figura 3.6: Mapa de blocos de tipo/uso do solo.

## 3.2 Dados de Vazão

Os postos utilizados para a definição das sub-bacias (Tabela 3.1) tiveram seus dados consistidos organizados no intervalo compreendido entre Jan/1968 e Dez/1990. Para servirem de base para ajuste e verificação do modelo, seus dados intervalos com falhas foram preenchidos com o valor de uma unidade negativa, para não serem utilizados.

Tabela 3.1: Postos fluviométricos utilizados.

Código	Nome
61012000	Madre de Deus de Minas
61060000	Faz.Laranjeiras
61075000	Luminárias
61078000	Itumirim
61107000	Porto Tiradentes
61135000	Ibituruna
61145000	Macaia
61272000	Itajubá
61285000	São João de Itajubá
61305000	Santa Rita do Sapucaí

Código	Nome
6135000	Conceição dos Ouros
61370000	Ponte Rodrigues
61410000	Careaçu
61425000	Paraguaçu
61460000	Conceição do Rio Verde
61473000	Baependi
61500000	Faz. Juca Casimiro
61510000	Três Corações
61537000	Porto Buenos

### 3.3 Dados de precipitação

Neste ponto, utilizou-se a rotina já mencionada que é responsável por elaborar um arquivo de chuvas diárias para todas as células da imagem de baixa resolução em todo o intervalo de tempo estudado. O resultado desta interpolação é utilizado pelo modelo para cálculos de balanço hídrico.

### 3.4 Dados de clima

Para o cálculo de balanço hídrico, o modelo necessita de informações climáticas da região, entre elas temperatura, umidade, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação na superfície. Para tanto, foram utilizadas as estações localizados nos municípios de Machado, Lavras, Itajubá e Campos do Jordão (Figura 3.7), porém devido à baixa disponibilidade de registros diários, foram utilizadas médias mensais no lugar de dados diários (Tabela 3.2, Tabela 3.3, Tabela 3.4, Tabela 3.5 e Tabela 3.6).

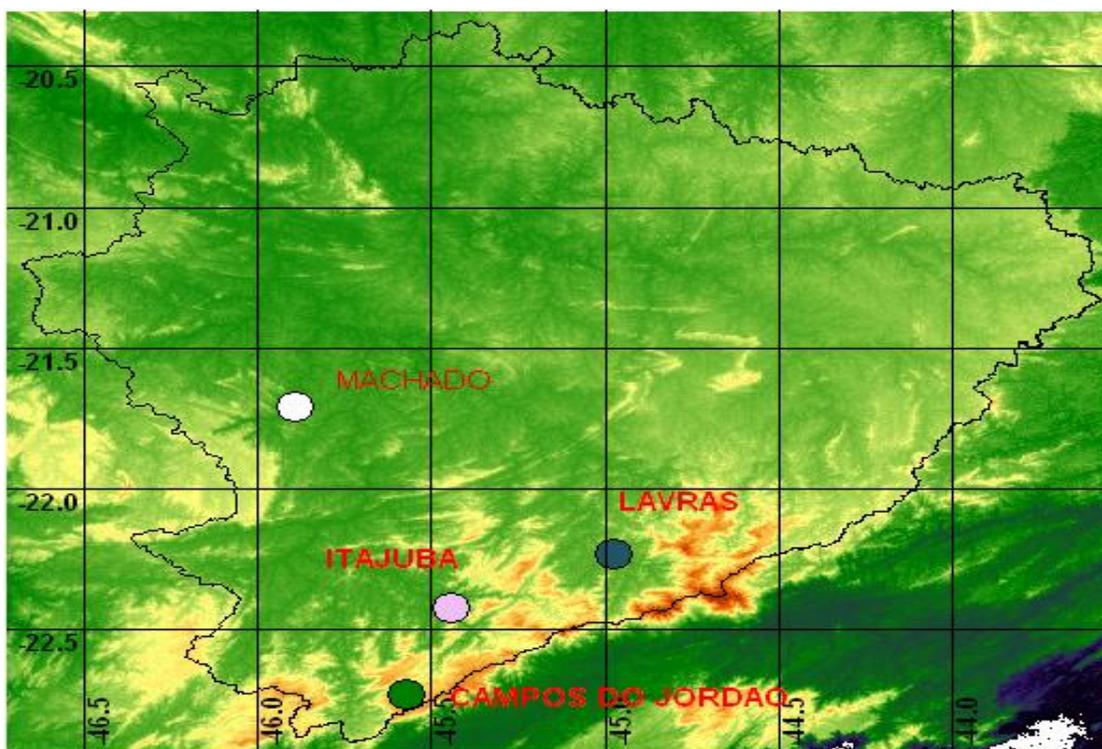


Figura 3.7: Localização dos postos climáticos utilizados.

Tabela 3.2: Temperatura média mensal nas estações climáticas.

Temperatura Média Mensal (°C)												
Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Machado	22.3	22.3	21.9	21.0	17.9	17.0	16.2	18.4	19.5	21.4	21.6	22.1
Lavras	22.1	22.3	21.4	20.1	17.5	16.5	16.4	18.2	19.5	21.0	21.0	21.5
Itajubá	22.3	22.1	21.6	20.0	16.4	15.4	15.1	16.7	18.9	20.7	21.1	22.1
C. do Jordão	18.1	17.9	17.4	16.1	12.9	11.6	11.4	12.2	14.0	16.0	16.5	17.9

Tabela 3.3: Umidade relativa média mensal nas estações climáticas.

Umidade Relativa (%)												
Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Machado	88.1	84.0	84.8	82.3	83.4	81.2	75.1	70.0	72.3	74.0	81.3	85.2
Lavras	85.0	82.0	86.8	82.7	81.2	78.4	73.6	66.6	74.6	77.0	79.0	84.0
Itajubá	81.8	80.1	81.0	78.9	80.4	81.0	77.1	71.6	71.9	72.9	75.6	79.3
C. do Jordão	88.8	87.8	88.6	85.4	86.3	85.1	83.1	79.5	83.3	83.2	87.1	87.5

Tabela 3.4: Duração de insolação média mensal nas estações climáticas.

Insolação (horas/dia)												
Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Machado	6.9	7.0	6.9	7.6	7.3	7.1	8.5	7.4	5.8	7.2	7.5	6.9
Lavras	6.9	7.0	6.9	7.6	7.3	7.1	8.5	7.4	5.8	7.2	7.5	6.9
Itajubá	6.9	7.0	6.9	7.6	7.3	7.1	8.5	7.4	5.8	7.2	7.5	6.9
C. do Jordão	6.9	7.0	6.9	7.6	7.3	7.1	8.5	7.4	5.8	7.2	7.5	6.9

Tabela 3.5: Velocidade do vento média mensal.

Vento (m/s)												
Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Machado	2.8	2.3	2.4	2.1	2.2	2.0	2.8	2.9	3.1	3.3	2.9	2.9
Lavras	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.6
Itajubá	5.7	5.5	5.6	5.1	4.9	5.3	4.9	5.0	5.2	5.2	5.1	5.1
C. do Jordão	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	2.0	2.2	2.0	2.6	2.3	1.0	1.0

Tabela 3.6: Pressão atmosférica média mensal.

Pressão (kPa)												
Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Machado	91.4	91.5	91.6	91.7	91.9	92.0	92.1	91.9	91.8	91.6	91.5	91.5
Lavras	91.2	91.3	91.4	91.5	91.6	91.8	91.9	91.8	91.6	91.4	91.2	91.2
Itajubá	91.2	91.3	91.4	91.5	91.6	91.8	91.9	91.8	91.6	91.4	91.2	91.2
C. do Jordão	84.7	84.7	84.7	84.7	84.7	84.7	84.8	84.8	84.7	84.7	84.7	84.7

### 3.5 Elaboração do arquivo resumo dos mapas

Para a utilização do modelo, faz-se necessária a união dos mapas de cotas, direções de fluxo, declividades, comprimento do rio, áreas acumuladas, blocos tipo/uso do solo, sub-bacias e células exutórias, em apenas um arquivo ASCII. Isto é realizado por meio de uma rotina, que organiza de forma automática esses dados por células de baixa resolução, referenciadas pelas coordenadas geográficas.

### 3.6 Execução da rotina MGB-IPH

#### 3.6.1 Calibração

Após a realização dos passos descritos nos itens anteriores, são realizados os primeiros ajustes manuais dos parâmetros para as sub-bacias. Feito isso, o modelo parte para uma calibração automática, no sentido de bacias montantes para jusantes, comparando os valores observados nos postos fluviométricos e realizando simulações para cálculos de NS, NSlog e  $\Delta V$ .

Decidiu-se por realizar a calibração automática apenas para as sub-bacias do rio Sapucaí, tendo seus resultados apresentados na Tabela 3.7, devido ao grande tempo necessário pelo modelo para ajuste de cada sub-bacia.

Tabela 3.7: Resultados dos parâmetros de calibração para a bacia do Sapucaí.

	<b>Conceição Dos Ouros</b>	<b>Ponte Rodrigues</b>	<b>Itajubá</b>	<b>São João de Itajubá</b>	<b>Santa Rita do Sapucaí</b>	<b>Careaçu</b>	<b>Paraguaçu</b>
<b>NS</b>	0.56	0.523	0.253	0.582	0.609	0.692	0.714
<b>NSLog</b>	0.704	0.619	0.458	0.661	0.703	0.782	0.773
<b><math>\Delta V</math></b>	0.105	0.532	-0.386	-1.12	-1.585	-5.726	-0.359

A Tabela 3.7 é produto de cálculo dos hidrogramas que serão apresentados da Figura 3.8 à Figura 3.16.

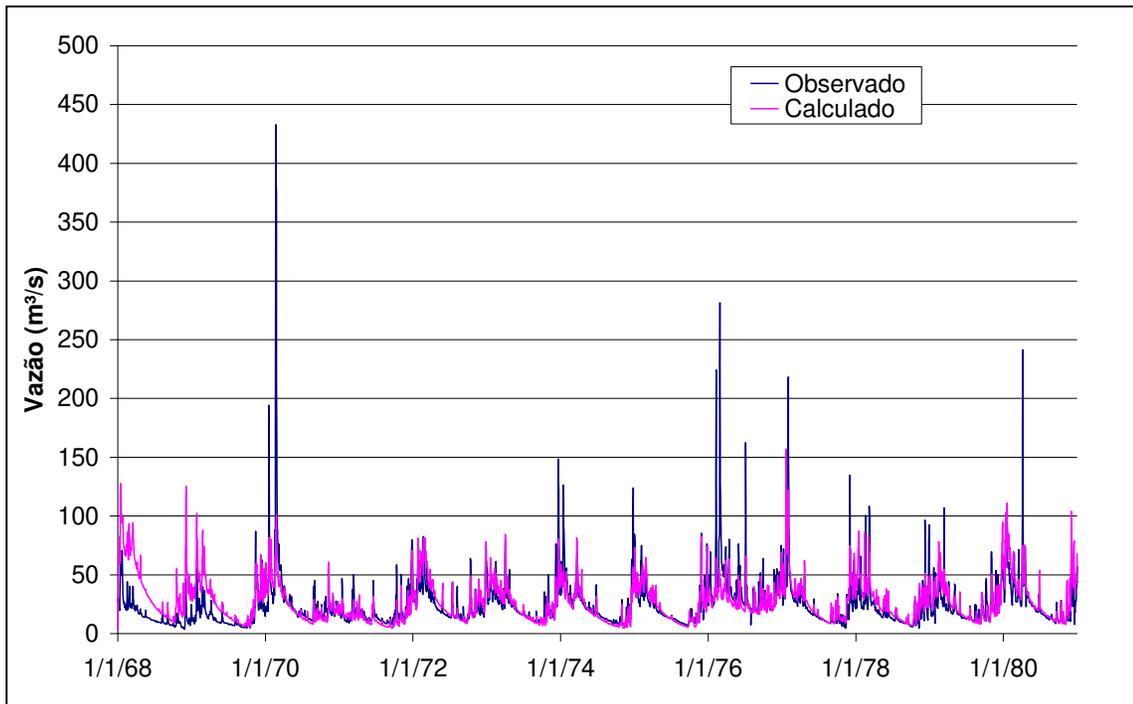


Figura 3.8: Hidrograma de calibração para Conceição dos Ouros.

Na Figura 3.8, podemos observar falhas na correlação entre os hidrogramas calculados e observados, especialmente nos picos que poucas vezes se assimilaram. Isto fica ainda mais evidenciado pelo baixo valor do coeficiente NS, da ordem de 56%.

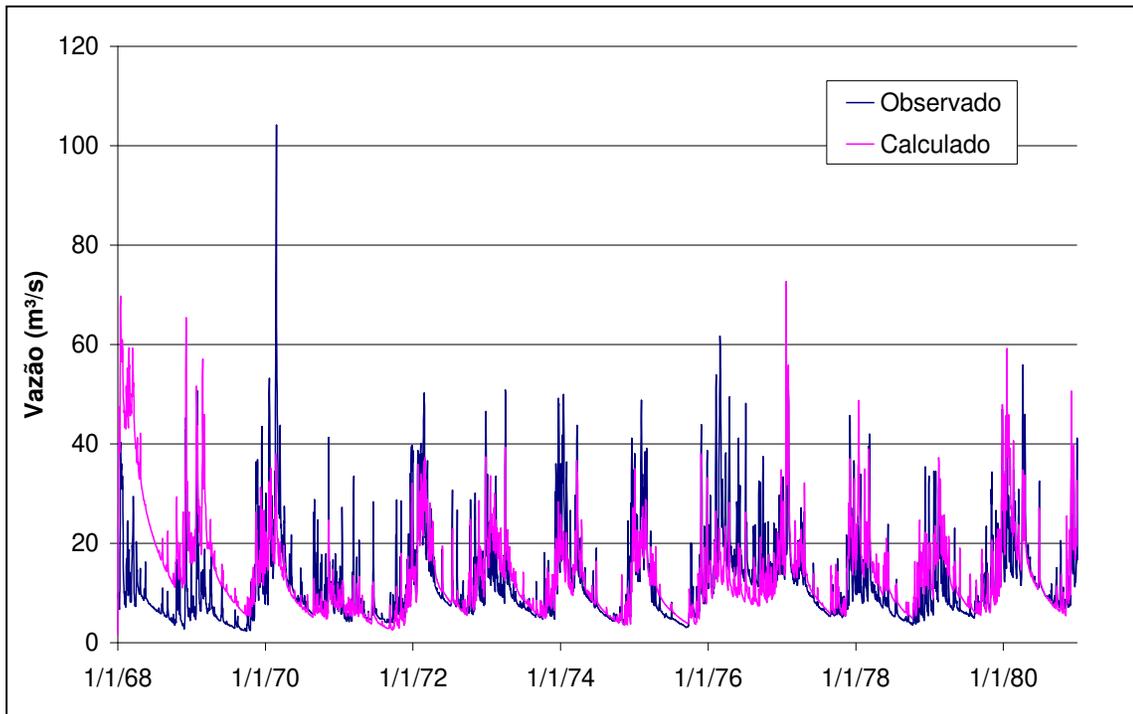


Figura 3.9: Hidrograma de calibração para Ponte Rodrigues.

Na Figura 3.9, observa-se um ajuste bastante falho no começo da série, estabilizando por volta de 1970. Esse fato foi o responsável pelos baixos coeficientes NS observados para esse posto.

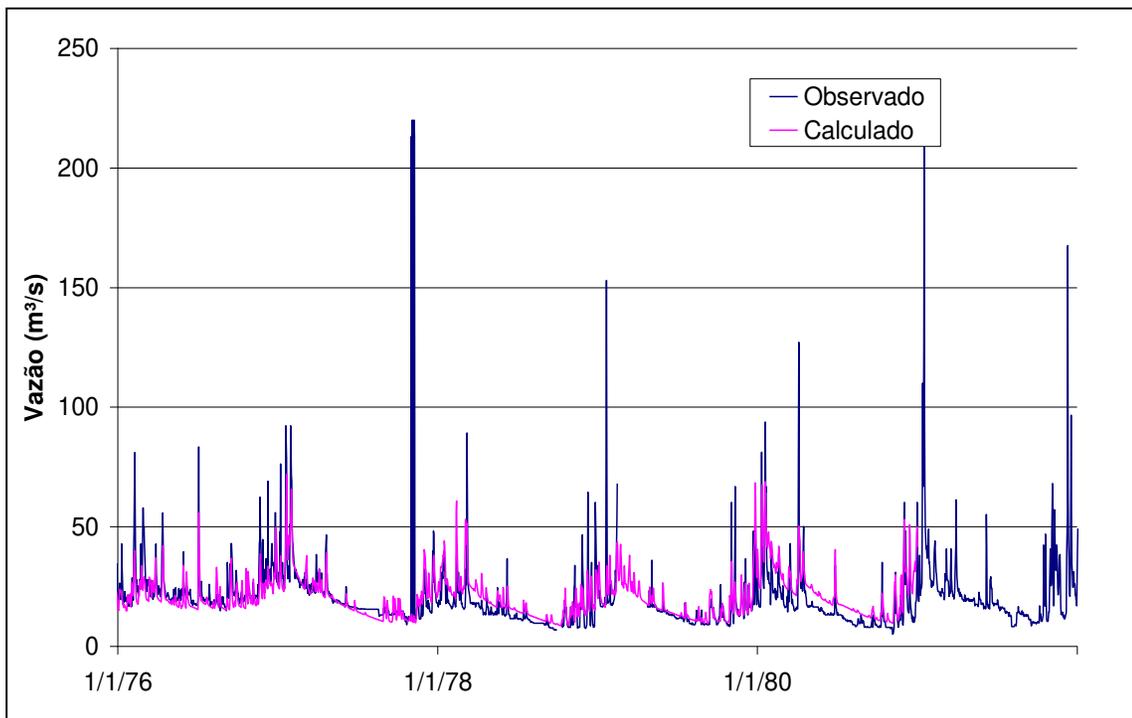


Figura 3.10: Hidrograma de calibração para Itajubá.

O ajuste para Itajubá, evidenciado na Figura 3.10, ficou prejudicado pela baixa quantidade de dados consolidados, somando pouco mais de seis anos. Existem ainda dados de picos, Figura 3.11, que devem ser consolidados por correlação com outros postos, pois seus valores se apresentam muito elevados.

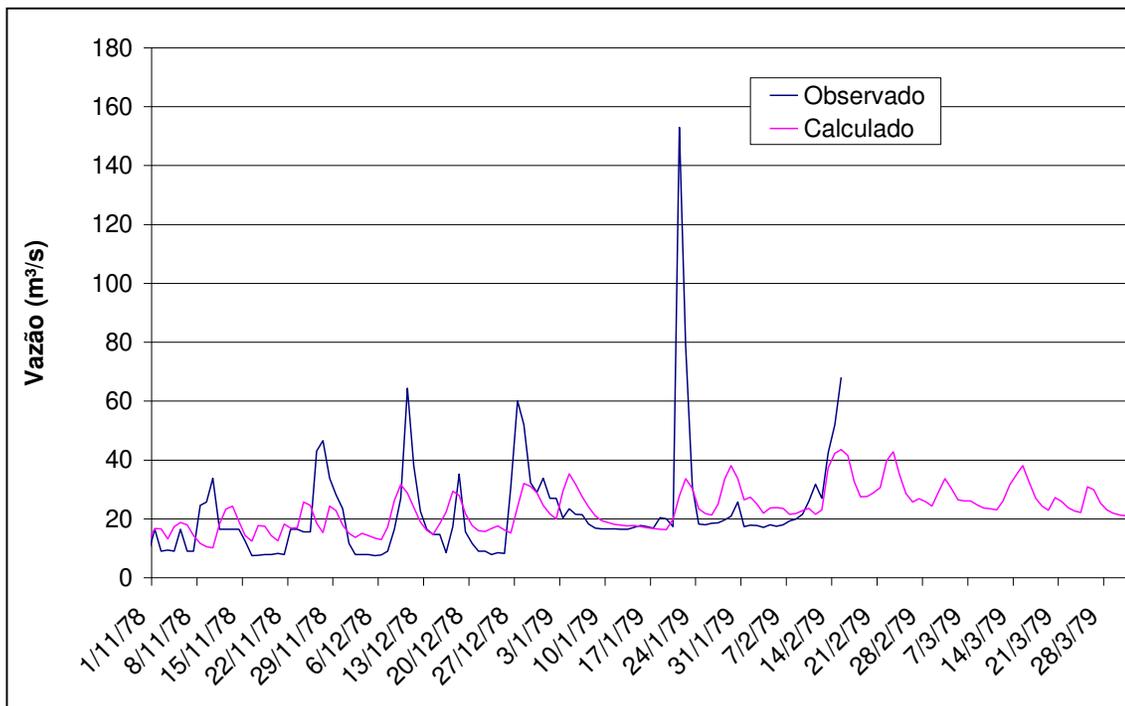


Figura 3.11: Detalhe no hidrograma de calibração de Itajubá entre Novembro de 1978 e Março de 1979.

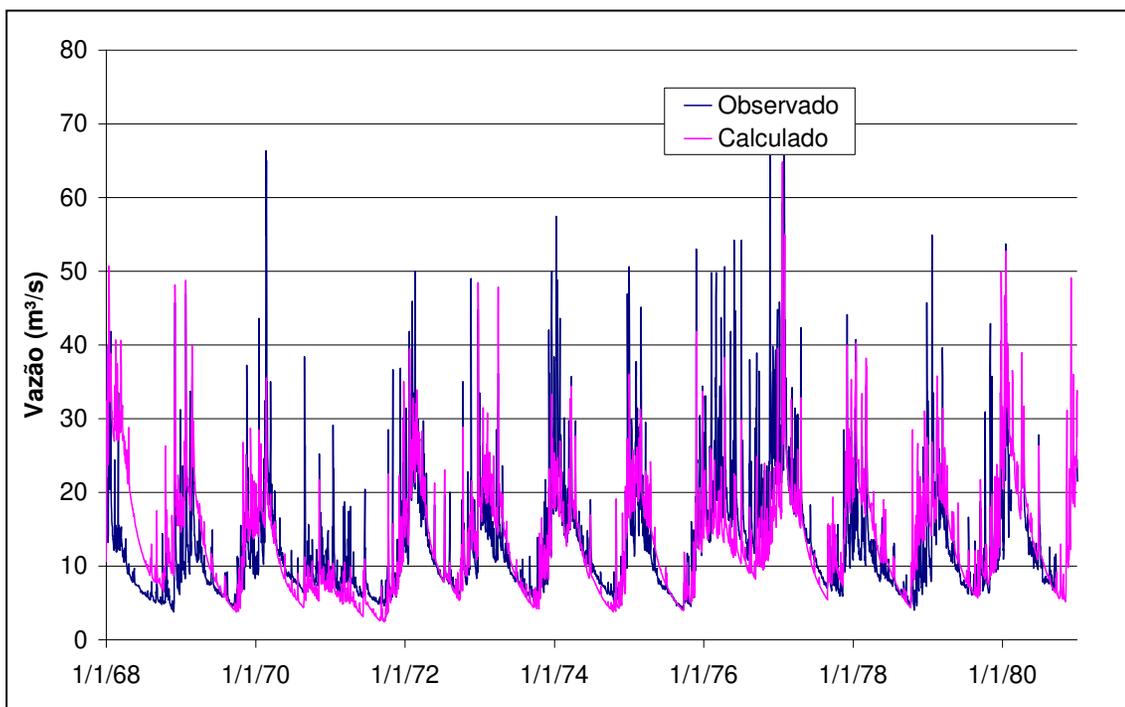


Figura 3.12: Hidrograma de calibração para São João de Itajubá.

O ajuste para a sub-bacia São João de Itajubá ficou visualmente bom, com os dois hidrogramas se acompanhando em vários pontos, porém existem vazões extremas que o modelo apresentou que não foram registradas nas observações, e o contrário também é verdadeiro.

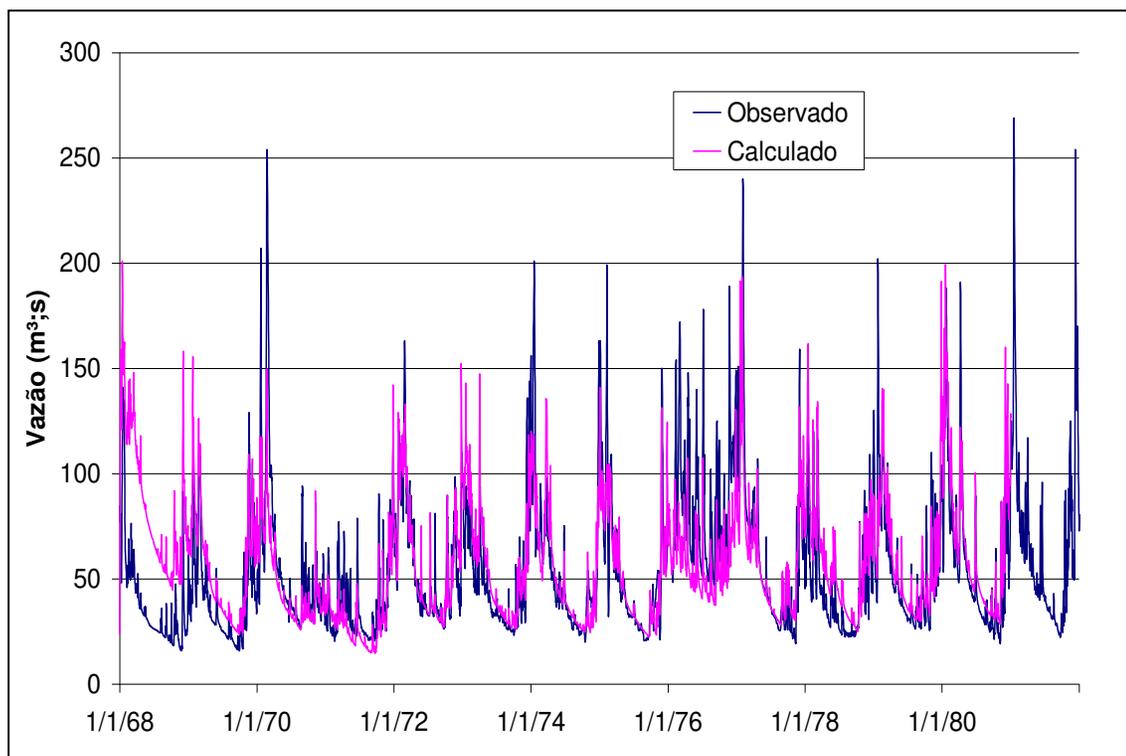


Figura 3.13: Hidrográfico de calibração para Santa Rita do Sapucaí.

A sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí já apresenta uma drenagem de montante maior, portanto era esperado que o ajuste do modelo fosse mais preciso, o que foi confirmado nas simulações, apresentando um valor de NS superior a 60% e NSLog superior a 70%.

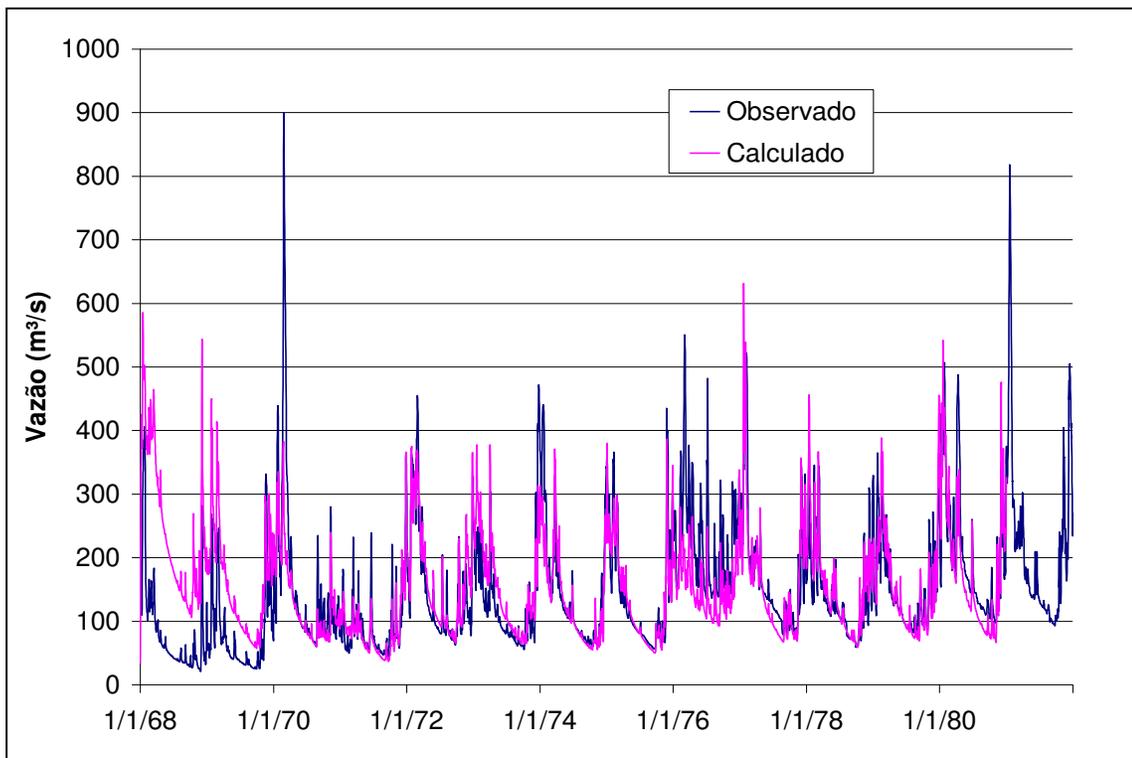


Figura 3.14: Hidrograma de calibração para Careaçú.

A sub-bacia de Careaçú também apresenta área de drenagem maior, e isso implicou em resultados de NS de 69% e NSLog de 78%, considerados bons, mesmo com os erros no início da série.

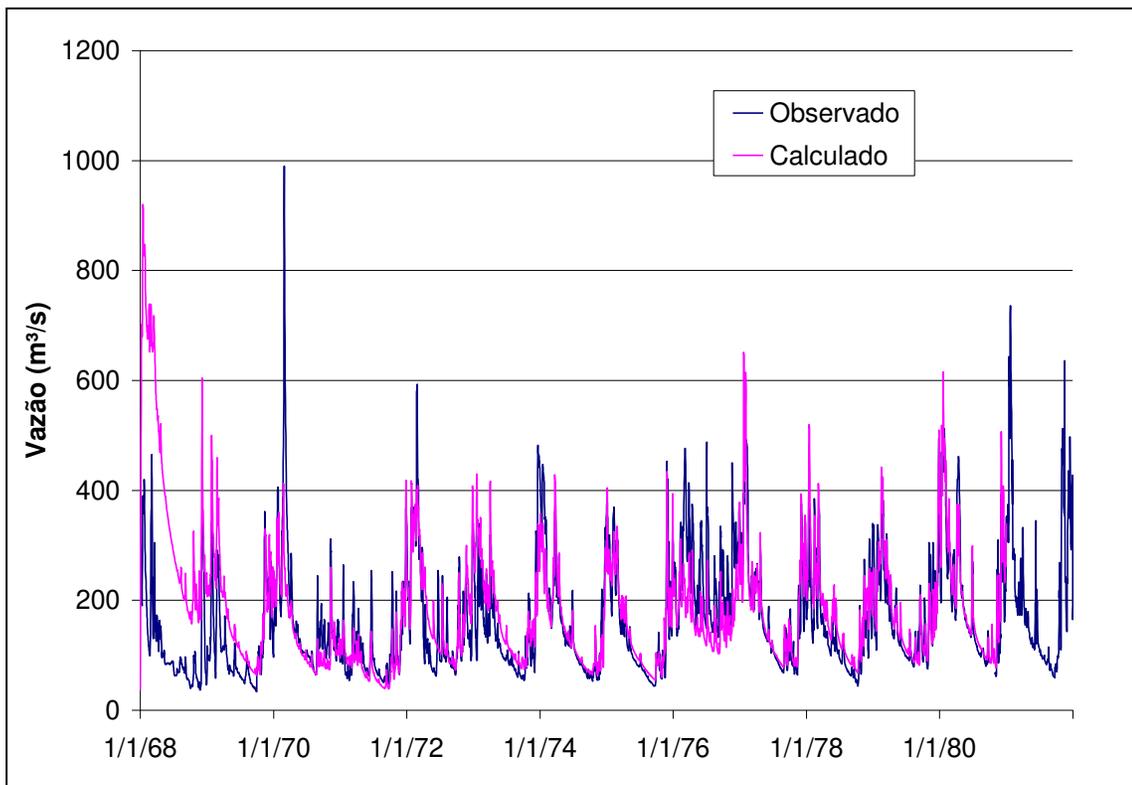


Figura 3.15: Hidrograma de calibração para Paraguaçu.

A sub-bacia de Paraguaçu é a que apresenta maior área de drenagem de todas as calibradas pelo modelo. Na Figura 3.15 é possível observar uma grande divergência no começo das simulações, mesmo assim, no geral, os valores de NS e NSLog foram superiores a 70%, valor considerado bom para este tipo de simulação. A Figura 3.16 apresenta um detalhe no ano de 1974 com boa coincidência temporal dos picos.

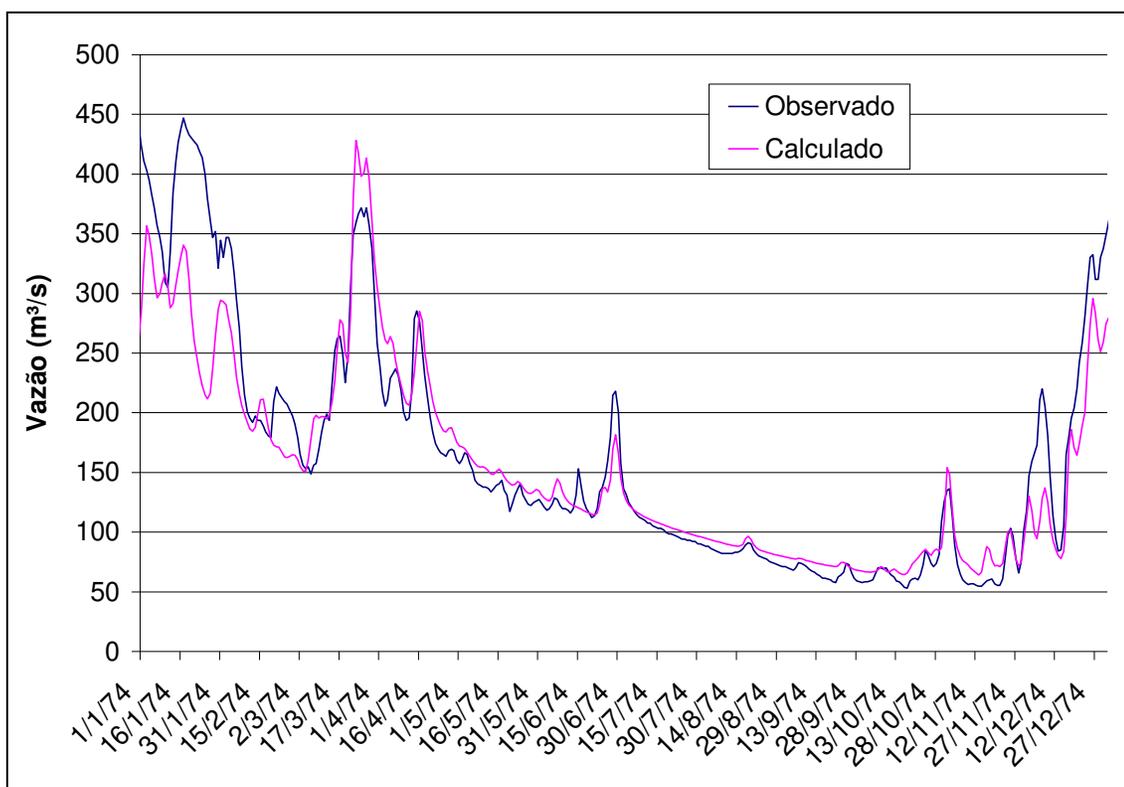


Figura 3.16: Detalhe do hidrograma de calibração de Paraguaçu para o ano de 1974.

Além dos resultados já apresentados, existem ainda as sub-bacias que não foram calibradas automaticamente pelo modelo, recebendo apenas a calibração manual, e um resumo de seus resultados encontram-se na Tabela 3.8

Tabela 3.8: Resultados dos parâmetros de calibração para as bacias do Rio Verde e do Rio Grande.

Sub-bacia	Conceição do Rio Verde	Faz. Juca Casimiro	Baependi	Três Corações	Porto Buenos	Faz. Laranjeiras	
NS	0.628	0.608	0.491	0.552	0.689	0.123	
NSLog	0.663	0.73	0.659	0.586	0.664	-1.156	
$\Delta V$	-25.271	-11.426	-14.093	-23.155	-16.784	-39.459	
Sub-bacia	Madre de Deus de Minas	Luminárias	Itumirim	Porto Tiradentes	Ibituruna	Macaia	Furnas
NS	0.241	0.547	0.357	0.117	0.109	0.15	-13.595
NSLog	-0.29	0.685	0.258	-0.186	-0.149	-0.731	-1.883
$\Delta V$	-30.107	-11.106	-22.306	-22.228	-27.968	-24.198	138.941

### 3.6.2 Validação

Dado os ajustes realizados no item 3.6.1, foram realizadas simulações para o período de 1981 a 1990, para os mesmo postos, obtendo-se os valores de ajuste expressos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Resultado dos parâmetros de ajuste durante a validação.

	Conceição dos Ouros	Ponte Rodrigues	Itajubá	São João de Itajubá	Santa Rita do Sapucaí	Careaçu	Paraguaçu
NS	0.543	0.721	0.558	0.654	0.761	0.739	0.807
NSLog	0.63	0.714	0.694	0.673	0.817	0.729	0.844
$\Delta V$	3.74	-1.831	-0.259	0.987	-2.98	-14.817	2.445

Da Figura 3.17 à Figura 3.23 serão apresentados os hidrogramas de validação para esses postos.

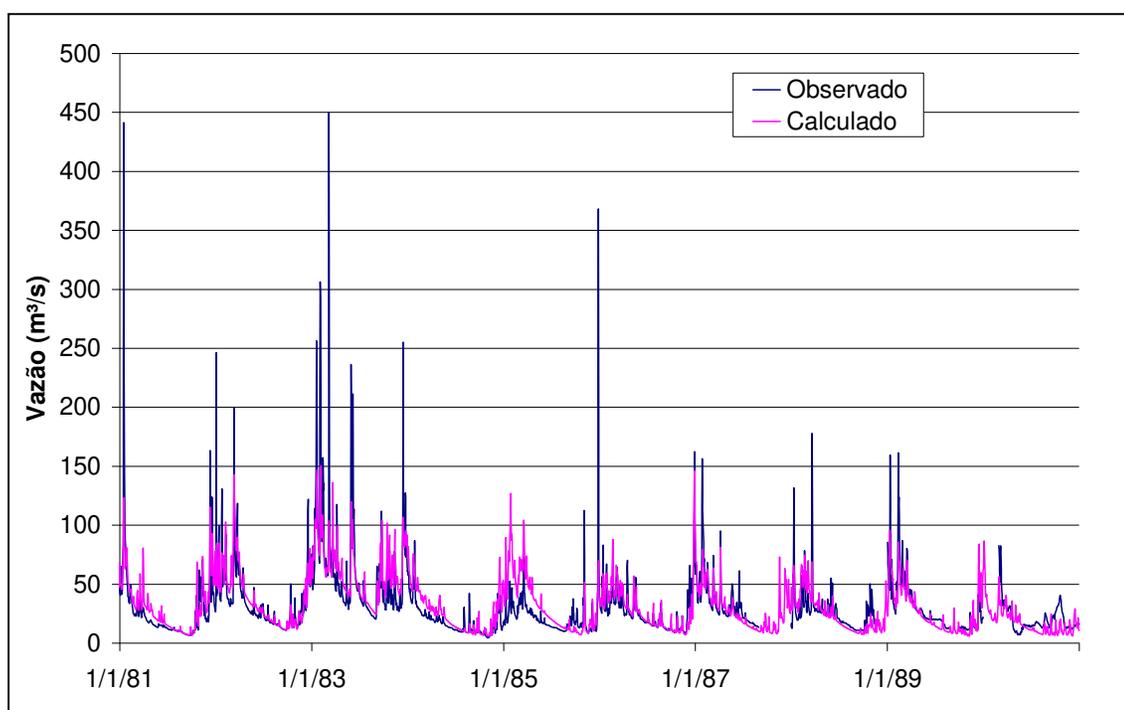


Figura 3.17: Hidrograma de validação para Conceição dos Ouros.

É possível observar bom comportamento das curvas de Conceição dos Ouros, especialmente nas vazões de estiagem. Para as cheias, o ano de 1987 foi o que apresentou melhor aproximação.

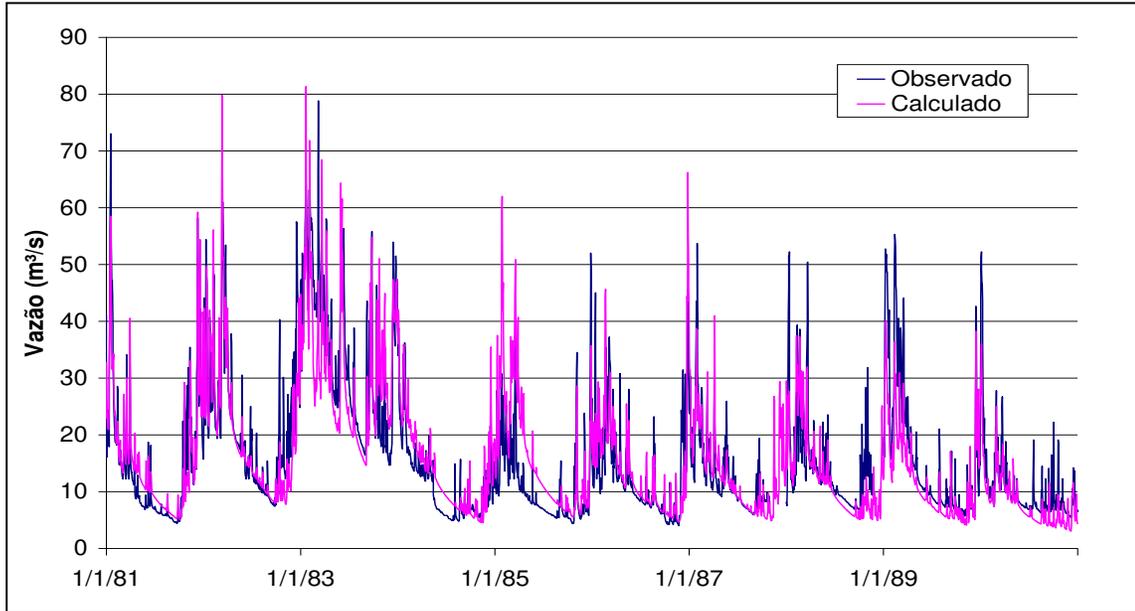


Figura 3.18: Hidrograma de validação para Ponte Rodrigues.

Ponte Rodrigues apresentou bom ajuste nos picos de vazão, assim como aconteceu na calibração.

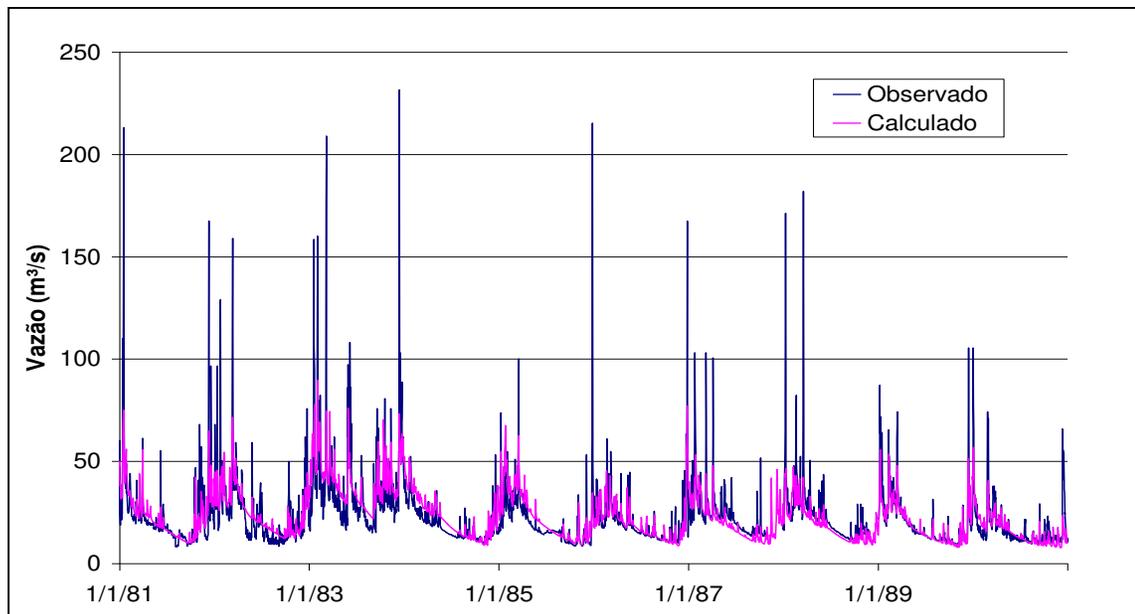


Figura 3.19: Hidrograma de validação para Itajubá.

Devido às falhas na calibração por baixa quantidade de dados e ainda não consolidação desses, é possível observar grandes dispersões nos picos de vazão, mas com bons ajustes nas vazões mínimas.

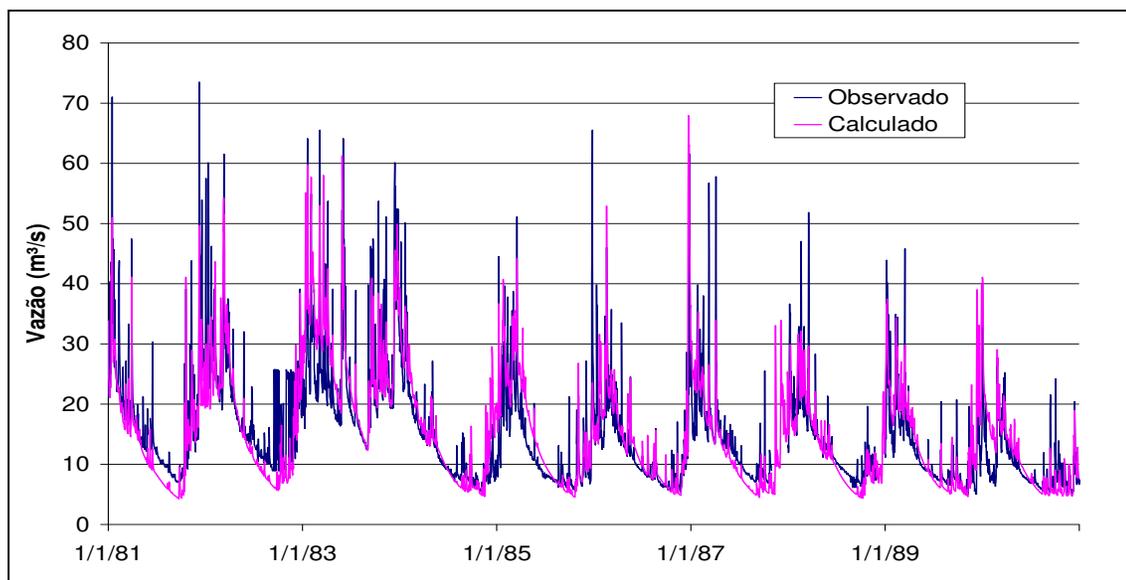


Figura 3.20: Hidrograma de validação São João de Itajubá.

São João de Itajubá apresentou um ajuste muito bom, mesmo sendo uma bacia de pequena drenagem, mas com picos e mínimas coincidentes.

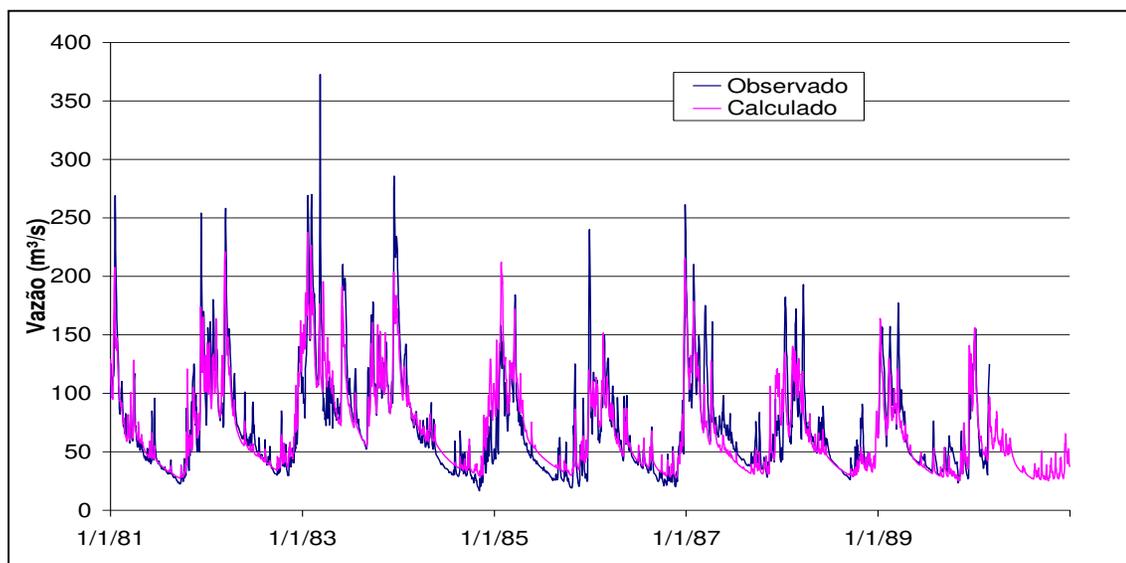


Figura 3.21: Hidrograma de validação para Santa Rita do Sapucaí.

Santa Rita apresenta boa concordância nos hidrogramas, como era esperado, já que na calibração seus resultados também se apresentaram próximos.

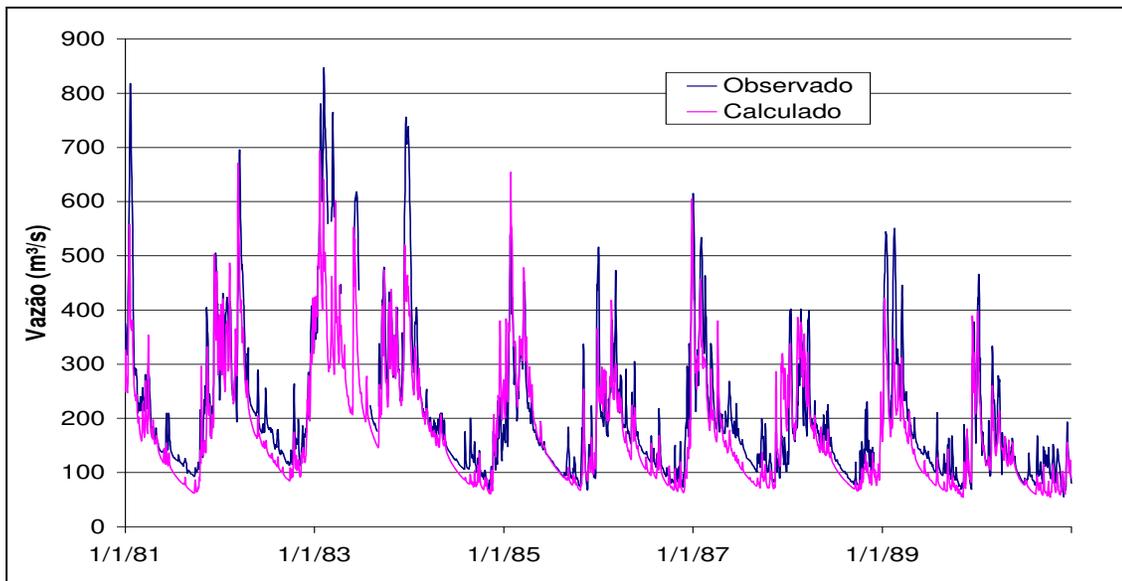


Figura 3.22: Hidrograma de validação para Careaçú.

A sub-bacia Careaçú apresentou boa concordância para os picos de vazão, especialmente nos anos de 1982, 1983 e 1987 em que as linhas da Figura 3.22 ficam coincidentes.

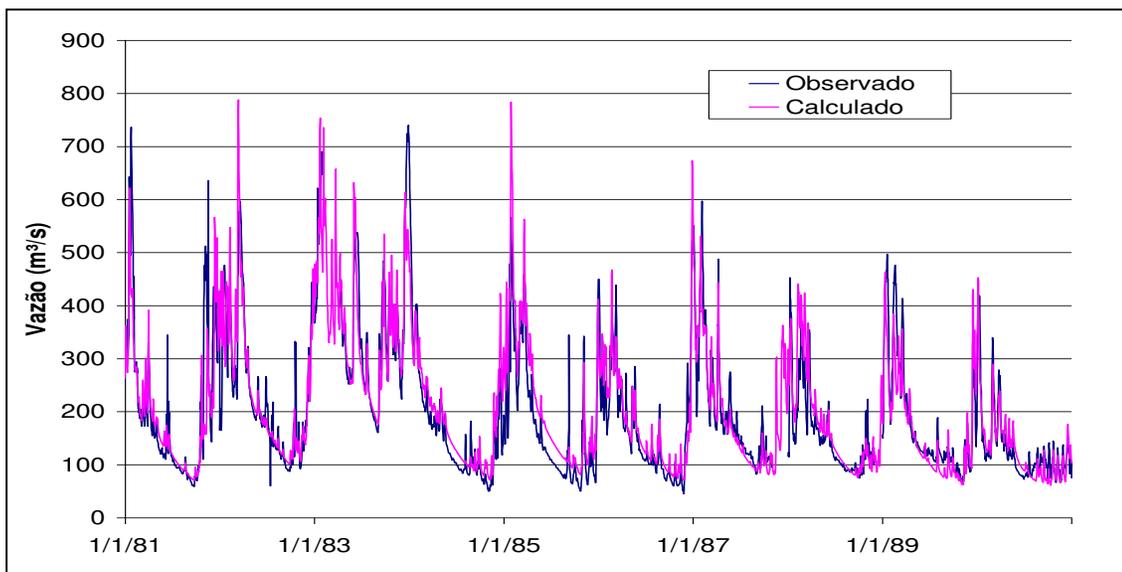


Figura 3.23: Hidrograma de validação para Paraguaçu.

A sub-bacia de Paraguaçu, que possui maior área de drenagem, apresentou boa concordância de picos de vazão e vazões de estiagem, desde o início da série.

### 3.6.3 Análise dos Resultados

Comparando-se os parâmetros de ajuste durante a calibração e na validação, obtemos a Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Comparação dos parâmetros de ajuste de calibração e validação.

/		Conceição dos Ouros	Ponte Rodrigues	Itajubá	São João de Itajubá	Santa Rita do Sapucaí	Careaçu	Paraguaçu
Calibração	NS	0.56	0.523	0.253	0.582	0.609	0.692	0.714
	NSLog	0.704	0.619	0.458	0.661	0.703	0.782	0.773
	$\Delta V$	0.105	0.532	-0.386	-1.12	-1.585	-5.726	-0.359
Validação	NS	0.543	0.721	0.558	0.654	0.761	0.739	0.807
	NSLog	0.63	0.714	0.694	0.673	0.817	0.729	0.844
	$\Delta V$	3.74	-1.831	-0.259	0.987	-2.98	-14.817	2.445

É possível observar melhoria nas simulações de todas sub-bacias, com exceção de Conceição dos Ouros que apresentou redução na qualidade das simulações.

Outro ponto importante a ser observado é a melhoria do ajuste com o aumento da área de drenagem da bacia, sendo que na Tabela 3.10, as sub-bacias encontram-se em ordem crescente de área. Isto se deve às rápidas variações de vazões que ocorrem em pequenas bacias, sendo geralmente de grande intensidade e pouca duração, sendo atenuadas à medida que se dirigem às sub-bacias jusantes.

## Anexo I

### Arquivo de entrada do modelo MGB-IPH – PARUSO.HIG

Este arquivo apresenta parâmetros de uso do solo, e é inalterado durante todas as simulações.

\*Início do arquivo Paruso.hig

Bacia 1

```
usoWm   b KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 358.2 0.36 78.42 361.41 724.20 0.67 0.00 0.05
agric_alta 847.9 0.41 91.50 271.06 579.36 0.67 0.00 0.06
  baixa 234.5 0.32 65.37 406.59 869.04 0.67 0.00 0.05
mata_media 1152.0 0.36 78.42 361.41 724.20 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 512.0 0.41 91.50 271.06 579.36 0.67 0.00 0.06
agua      0.0 0.11 78.42 406.59 724.20 0.67 0.50 0.50
RW        3.12
CS        65.18
CI        348.18
CB        2400.00
QB_M3/SKM2 0.01
```

Bacia 2

```
usoWm   b KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 387.3 0.19 395.23 101.62 192.95 0.67 0.00 0.05
agric_alta 419.4 0.21 461.16 76.21 154.45 0.67 0.00 0.06
  baixa 739.2 0.17 329.47 114.33 231.55 0.67 0.00 0.05
mata_media 2519.2 0.19 395.23 101.62 192.95 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 1119.6 0.21 461.16 76.21 154.37 0.67 0.00 0.06
agua      0.0 0.06 395.23 114.33 192.95 0.67 0.50 0.50
RW        4.71
CS        42.85
CI        103.00
CB        3800.00
QB_M3/SKM2 0.01
```

Bacia 3

```
usoWm   b KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 524.8 0.34 110.81 1116.03 2453.59 0.67 0.00 0.05
agric_alta 1342.2 0.38 129.29 837.03 1962.87 0.67 0.00 0.06
  baixa 176.3 0.30 92.37 1255.55 2944.31 0.67 0.00 0.05
mata_media 1764.9 0.34 110.81 1116.03 2453.59 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 784.4 0.38 129.29 837.03 1962.87 0.67 0.00 0.06
agua      0.0 0.10 110.81 1255.55 2453.59 0.67 0.50 0.50
RW        4.82
CS        81.80
CI        725.26
CB        3700.00
QB_M3/SKM2 0.01
```

Bacia 4

```
usoWm   b KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 479.3 0.39 74.97 3585.91 6473.62 0.67 0.00 0.05
agric_alta 480.7 0.44 87.47 2689.46 5178.90 0.67 0.00 0.06
  baixa 208.5 0.35 62.49 4034.19 7768.35 0.67 0.00 0.05
mata_media 601.3 0.39 74.97 3585.91 6473.62 0.67 0.00 0.05
```

pasta\_alta 267.3 0.44 87.47 2689.46 5178.90 0.67 0.00 0.06  
 agua 0.0 0.12 74.97 4034.19 6473.62 0.67 0.50 0.50  
 RW 4.38  
 CS 75.54  
 CI 1293.49  
 CB 3400.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 5  
 usoWm b KbasKintKflux XL CAP Wc  
 past\_media 501.8 0.17 12.94 571.39 925.53 0.67 0.00 0.05  
 agric\_alta 585.1 0.19 15.10 428.55 740.42 0.67 0.00 0.06  
     baixa 279.5 0.15 10.79 642.82 1110.63 0.67 0.00 0.05  
 mata\_media 2010.2 0.17 12.94 571.39 925.53 0.67 0.00 0.05  
 pasta\_alta 893.4 0.19 15.10 428.55 740.42 0.67 0.00 0.06  
 agua 0.0 0.05 12.94 642.82 925.53 0.67 0.50 0.50  
 RW 4.58  
 CS 164.45  
 CI 234.32  
 CB 5200.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 6  
 usoWm b KbasKintKflux XL CAP Wc  
 past\_media 155.3 0.17 618.53 798.12 1874.90 0.67 0.00 0.05  
 agric\_alta 378.7 0.19 721.72 598.55 1500.79 0.67 0.00 0.06  
     baixa 1926.3 0.15 515.62 897.95 2249.97 0.67 0.00 0.05  
 mata\_media 1574.5 0.17 618.53 798.12 1874.90 0.67 0.00 0.05  
 pasta\_alta 699.8 0.19 721.72 598.55 1500.01 0.67 0.00 0.06  
 agua 0.0 0.05 618.53 897.95 1874.90 0.67 0.50 0.50  
 RW 7.38  
 CS 137.59  
 CI 302.72  
 CB 4350.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 7  
 usoWm b KbasKintKflux XL CAP Wc  
 past\_media 715.3 0.11 1878.13 11.18 23.73 0.67 0.00 0.05  
 agric\_alta 498.2 0.12 2191.43 8.38 19.00 0.67 0.00 0.06  
     baixa 874.5 0.10 1565.64 12.58 28.48 0.67 0.00 0.05  
 mata\_media 7091.5 0.11 1878.13 11.18 23.73 0.67 0.00 0.05  
 pasta\_alta 3151.7 0.12 2191.43 8.38 18.99 0.67 0.00 0.06  
 agua 0.0 0.03 1878.13 12.58 23.73 0.67 0.50 0.50  
 RW 5.77  
 CS 142.35  
 CI 231.34  
 CB 3100.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 8  
 usoWm b KbasKintKflux XL CAP Wc  
 past\_media 325.5 0.18 140.66 151.72 265.51 0.67 0.00 0.05  
 agric\_alta 858.7 0.21 164.12 113.79 212.41 0.67 0.00 0.06  
     baixa 357.0 0.17 117.25 170.69 318.61 0.67 0.00 0.05  
 mata\_media 1058.9 0.18 140.66 151.72 265.51 0.67 0.00 0.05  
 pasta\_alta 470.6 0.21 164.12 113.79 212.41 0.67 0.00 0.06  
 agua 0.0 0.06 140.66 170.69 265.51 0.67 0.50 0.50  
 RW 2.99  
 CS 112.07

CI 184.15  
 CB 5950.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 9  
 usoWm b KbasKintKflux XL CAP Wc  
 past\_media 405.3 0.37 129.11 1286.15 2692.72 0.67 0.00 0.05  
 agric\_alta 1089.7 0.42 150.64 964.62 2154.18 0.67 0.00 0.06  
     baixa 268.4 0.33 107.62 1446.94 3231.27 0.67 0.00 0.05  
 mata\_media 1217.0 0.37 129.11 1286.15 2692.72 0.67 0.00 0.05  
 pasta\_alta 540.9 0.42 150.64 964.62 2154.18 0.67 0.00 0.06  
 agua 0.0 0.11 129.11 1446.94 2692.72 0.67 0.50 0.50  
 RW 2.72  
 CS 121.56  
 CI 87.84  
 CB 4500.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 10  
 usoWm b KbasKintKflux XL CAP Wc  
 past\_media 189.3 0.50 156.23 2154.42 6817.01 0.67 0.00 0.05  
 agric\_alta 578.7 0.58 182.28 1615.81 5453.61 0.67 0.00 0.06  
     baixa 286.4 0.45 130.23 2423.75 8180.41 0.67 0.00 0.05  
 mata\_media 771.8 0.50 156.23 2154.42 6817.01 0.67 0.00 0.05  
 pasta\_alta 343.0 0.58 182.28 1615.81 5453.61 0.67 0.00 0.06  
 agua 0.0 0.15 156.23 2423.75 6817.01 0.67 0.50 0.50  
 RW 2.54  
 CS 62.35  
 CI 410.67  
 CB 4500.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 11  
 usoWm b KbasKintKflux XL CAP Wc  
 past\_media 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
 agric\_alta 340.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
     baixa 200.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
 mata\_media 900.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
 pasta\_alta 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
 agua 0.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.50 0.50  
 RW 1.51  
 CS 20.00  
 CI 1000.00  
 CB 2000.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 12  
 usoWm b KbasKintKflux XL CAP Wc  
 past\_media 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
 agric\_alta 340.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
     baixa 200.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
 mata\_media 900.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
 pasta\_alta 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05  
 agua 0.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.50 0.50  
 RW 1.51  
 CS 20.00  
 CI 1000.00  
 CB 2000.00  
 QB\_M3/SKM2 0.01  
 Bacia 13

```

usoWm  b  KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agric_alta 340.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
  baixa 200.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
mata_media 900.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agua      0.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.50 0.50
RW        1.51
CS        20.00
CI        1000.00
CB        2000.00
QB_M3/SKM2 0.01
Bacia 14
usoWm  b  KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agric_alta 340.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
  baixa 200.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
mata_media 900.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agua      0.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.50 0.50
RW        1.51
CS        20.00
CI        1000.00
CB        2000.00
QB_M3/SKM2 0.01
Bacia 15
usoWm  b  KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 585.4 0.44 130.00 46.15 164.46 0.67 0.00 0.05
agric_alta 895.1 0.51 151.68 34.61 131.56 0.67 0.00 0.06
  baixa 183.9 0.40 108.36 51.91 197.35 0.67 0.00 0.05
mata_media 819.3 0.44 130.00 46.15 164.46 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 364.1 0.51 151.68 34.61 131.56 0.67 0.00 0.06
agua      0.0 0.13 130.00 51.91 164.46 0.67 0.50 0.50
RW        3.57
CS        93.48
CI        89.13
CB        4700.00
QB_M3/SKM2 0.01
Bacia 16
usoWm  b  KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 585.4 0.44 130.00 46.15 164.46 0.67 0.00 0.05
agric_alta 895.1 0.51 151.68 34.61 131.56 0.67 0.00 0.06
  baixa 183.9 0.40 108.36 51.91 197.35 0.67 0.00 0.05
mata_media 819.3 0.44 130.00 46.15 164.46 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 364.1 0.51 151.68 34.61 131.56 0.67 0.00 0.06
agua      0.0 0.13 130.00 51.91 164.46 0.67 0.50 0.50
RW        3.57
CS        93.48
CI        89.13
CB        4700.00
QB_M3/SKM2 0.01
Bacia 17
usoWm  b  KbasKintKflux  XL  CAP  Wc
past_media 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agric_alta 340.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
  baixa 200.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05

```

```

mata_media 900.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agua      0.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.50 0.50
RW        1.51
CS        20.00
CI        1000.00
CB        2000.00
QB_M3/SKM2 0.01
Bacia 18
usoWm    b KbasKintKflux XL CAP Wc
past_media 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agric_alta 340.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
  baixa 200.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
mata_media 900.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agua      0.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.50 0.50
RW        1.51
CS        20.00
CI        1000.00
CB        2000.00
QB_M3/SKM2 0.01
Bacia 19
usoWm    b KbasKintKflux XL CAP Wc
past_media 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agric_alta 340.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
  baixa 200.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
mata_media 900.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
pasta_alta 300.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.05
agua      0.0 0.32 5.76 37.00 100.00 0.67 0.50 0.50
RW        1.51
CS        20.00
CI        1000.00
CB        2000.00
QB_M3/SKM2 0.01
Bacia 20
usoWm    b KbasKintKflux XL CAP Wc
past_media 600.0 0.32 0.76 37.00 100.00 0.67 2.00 0.40
agric_alta 610.0 0.32 0.76 37.00 100.00 0.67 2.00 0.40
  baixa 585.0 0.32 0.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.10
mata_media 5000.0 0.32 0.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.10
pasta_alta 600.0 0.32 0.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.10
agua      0.0 0.32 0.76 37.00 100.00 0.67 0.00 0.10
RW        4.51
CS        44.00
CI        353.00
CB        4671.50
QB_M3/SKM2 0.01

```

\*Fim do arquivo Paruso.hig

## Anexo D – Aplicação do modelo de frequência e duração

### 1 MODELO FREQUÊNCIA - DURAÇÃO

As incertezas de operação do modelo acarretam conflitos entre os interesses dos usuários que residem a jusante de um reservatório e a que vive no seu entorno.

Assim, a proposta é minimizar os efeitos das operações, que levam os reservatórios a trabalhar em extremos, justificadas em sua grande parte por problemas macroeconômicos. Isto seria possível, caso as Usinas Hidrelétricas fossem outorgadas, pela duração e frequência do nível de água a ser mantida nos lagos, trazendo por consequência uma maior segurança na permanência tanto de cotas como de vazões.

Deste modo, num primeiro passo, buscou-se um critério neutro de operação, neste caso, o reservatório deveria perseguir uma vazão defluente, que se aproxima ao máximo da vazão média de longo termo, definindo uma política de operação de minimização do desvio-médio quadrático, ao longo do tempo, ou seja:

$$\min z = \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 \quad (\text{Equação 1.1})$$

Sujeito a:

$$VA_t = VA_o + \sum_{i=1}^T (Q_{ai} - Q_{di}) \quad (\text{Equação 1.2})$$

$$VA_{\min} \leq VA_t \leq VA_{\max}, \forall t \quad (\text{Equação 1.3})$$

Sendo:

$\bar{Q}$	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{di}$	Vazão defluente no instante i (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{ai}$	Vazão afluyente no instante i (m <sup>3</sup> /s)
$VA_t$	Volume regularizado (m <sup>3</sup> )
$VA_0$	Volume morto (m <sup>3</sup> )
$VA_{\min}$	Volume mínimo (m <sup>3</sup> )
$VA_{\max}$	Volume máximo (m <sup>3</sup> )

Essas equações revelam, na verdade, um antigo método gráfico, que era utilizado na primeira metade deste século para o estudo de regularização parcial em centrais hidrelétricas, conhecido como “fio estendido” ou Conti-Varlet, que será mais bem detalhado no item a seguir.

O método do fio estendido, conforme citado anteriormente, visa modular as vazões extremamente variáveis tomando - as o mais constante possível. Segundo Souza et al. (1999), isto poderá ser obtido da seguinte maneira:

Com base na demanda de água ao longo do tempo ( $Q_d(t)$ ) que pode ser medida ou sintetizada pode-se construir a curva do volume diferencial acumulado ( $VDA(t)$ ), que é a integral ou somatória da diferença entre a vazão consumida a cada instante e a vazão média consumida ( $Q_m$ ), dada pela Equação 1.4 ou pela Equação 1.5.

$$VDA(t) = \int_0^t [Q_d(\tau) - Q_m] d\tau \quad (\text{Equação 1.4})$$

$$VDA_I = \sum_{i=1}^I [(Q_{D_i} - Q_m) \Delta t] \quad (\text{Equação 1.5})$$

Pode-se construir essa curva conjuntamente com outra idêntica, mas deslocada para cima de uma distância correspondente ao volume disponível para armazenamento (VD). Caso já exista um reservatório, o volume desse será adotado como VD. Caso se deseje construir o reservatório, o estudo

deverá ser feito para diferentes volumes, sendo que uma análise econômica definirá o volume ótimo (Figura 1.1).

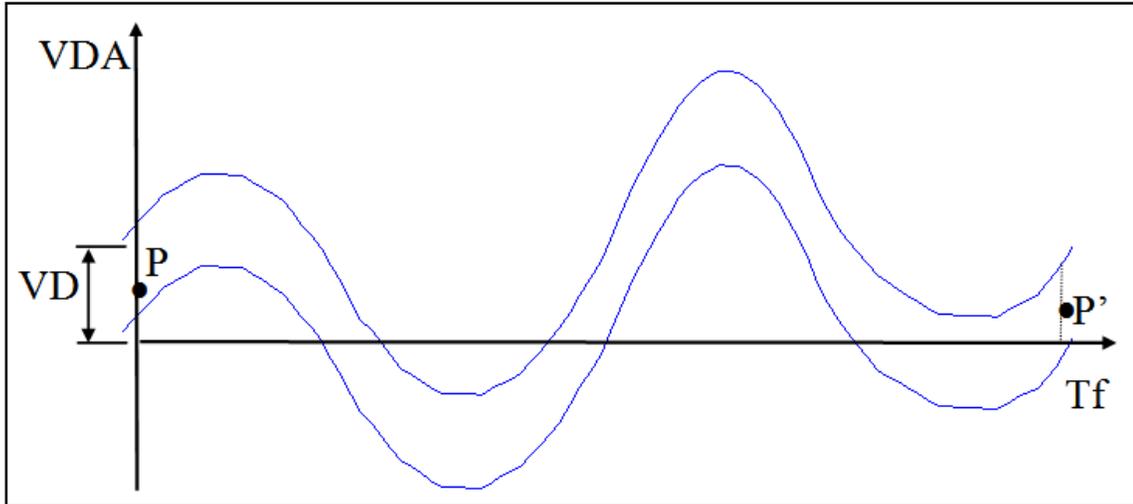


Figura 1.1: Curva do volume diferencial acumulado.

Partindo-se de um ponto genérico P, indicado na Figura 1.1, busca-se o “melhor” caminho para alcançar P', respeitando-se o limite superior e inferior, que representam a capacidade de armazenamento, e a função da demanda. A vazão regularizada (QR), em cada instante de tempo, será dada pela (Equação 1.6), em que VAO (t) é o volume acumulado dado pela curva otimizada.

$$Q_R(t) = -\frac{dVAO(t)}{dt} + Q_m \quad (\text{Equação 1.6})$$

O método do fio estendido, já citado, define esse caminho. Entretanto, assumindo-se que a curva de demanda seja cíclica, o ponto P deve ter o mesmo deslocamento de P' em relação ao eixo x, pois o estudo se repetiria a partir de então. Também a inclinação da reta em P deveria ser a mesma que em P'. Isto induz a se fazer um estudo iterativo, variando-se P e P' simultaneamente. Tal procedimento é válido, mas moroso. Uma alternativa é repetir duas vezes o ciclo de carga e definir P e P' quaisquer. A operação ótima será aquela correspondente ao ciclo intermediário. Ao se proceder assim, elimina-se o efeito das pontas (P e P') (Figura 1.2).

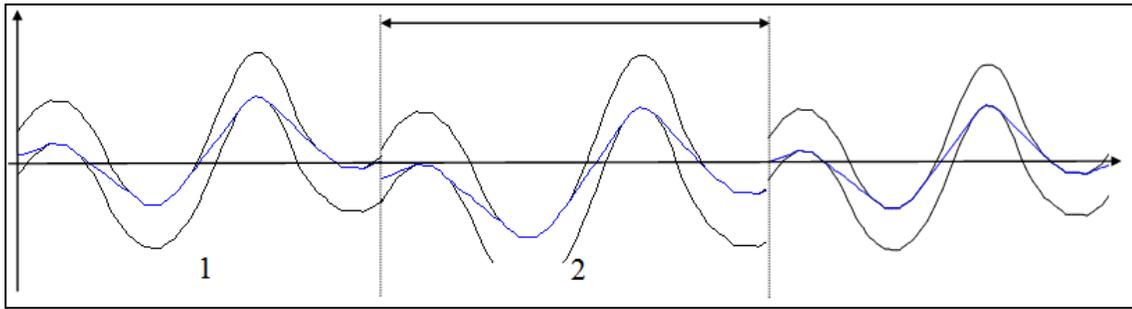


Figura 1.2: Determinação da operação.

Sobre o critério de otimização, cabe ressaltar que o método de Conti-Varlet busca o menor caminho entre os extremos. O procedimento computacional adotado para se encontrar o caminho do “fio estendido” utilizou Programação Dinâmica, que vem apresentando bons resultados.

Os gráficos (Figura 1.3 e Figura 1.4) mostram, para o lago de Furnas, o efeito regularizador alcançado, utilizando-se somente este critério. Os gráficos da Figura 1.5 e Figura 1.6 apresentam, respectivamente, as curvas de duração de vazões e de nível ao reservatório. Os dados básicos de cota e vazão, utilizados para esses estudos, estão na Tabela 1.1 e Tabela 1.2, deste Anexo D.

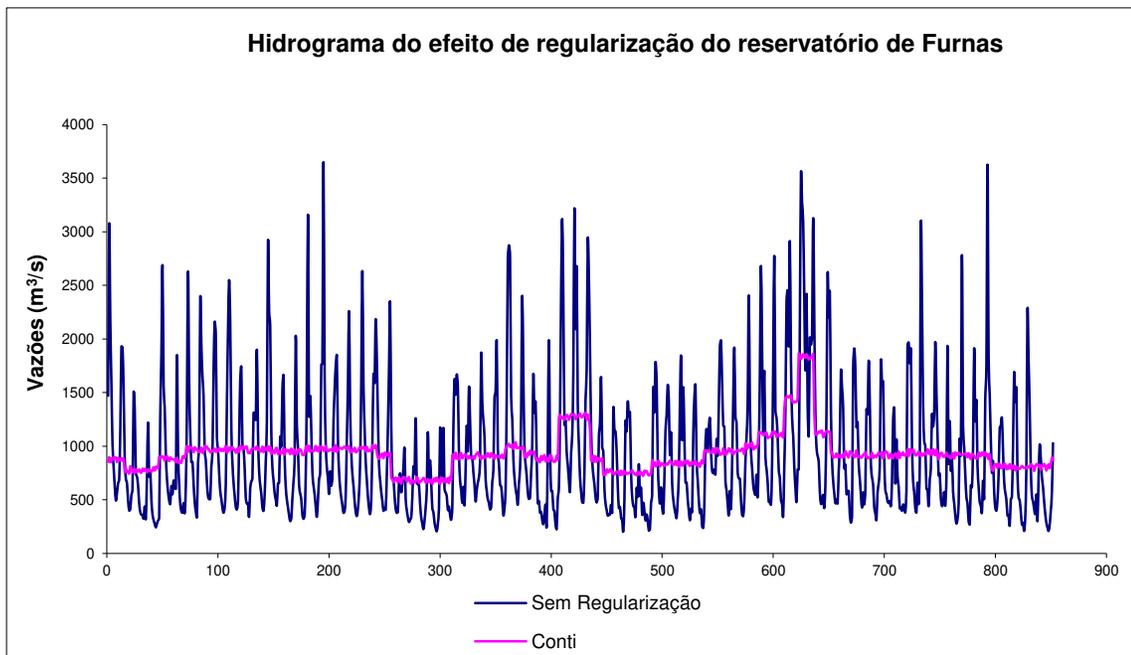


Figura 1.3: Hidrograma de Furnas com e sem regularização.

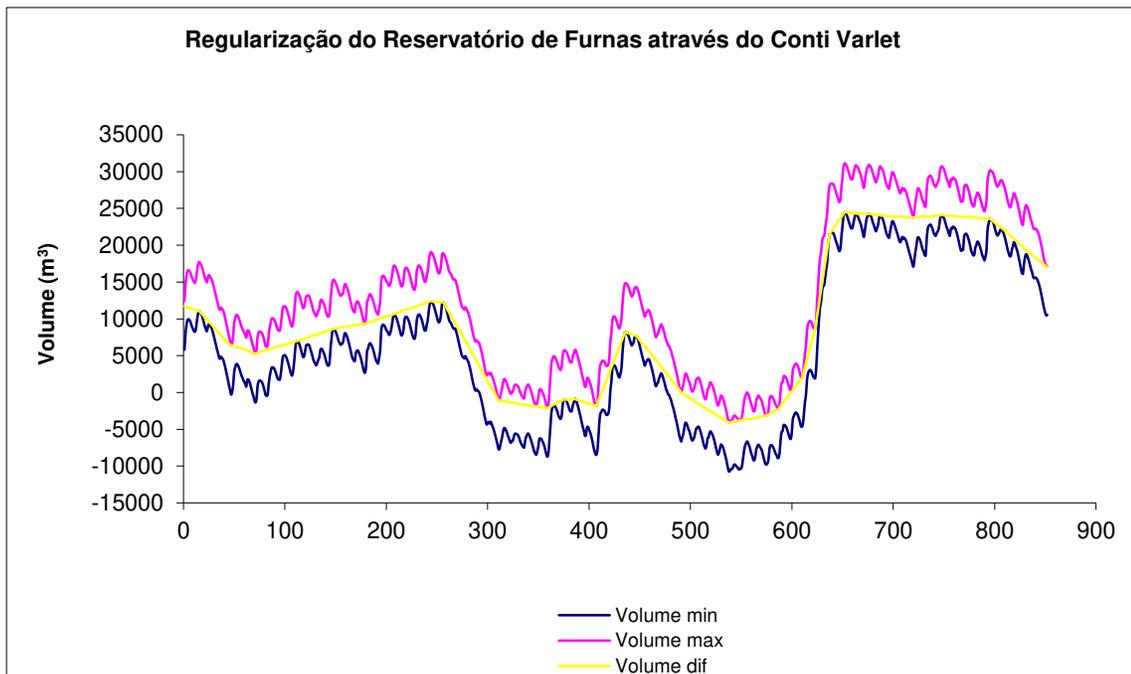


Figura 1.4: Regularização do volume do reservatório de furnas.

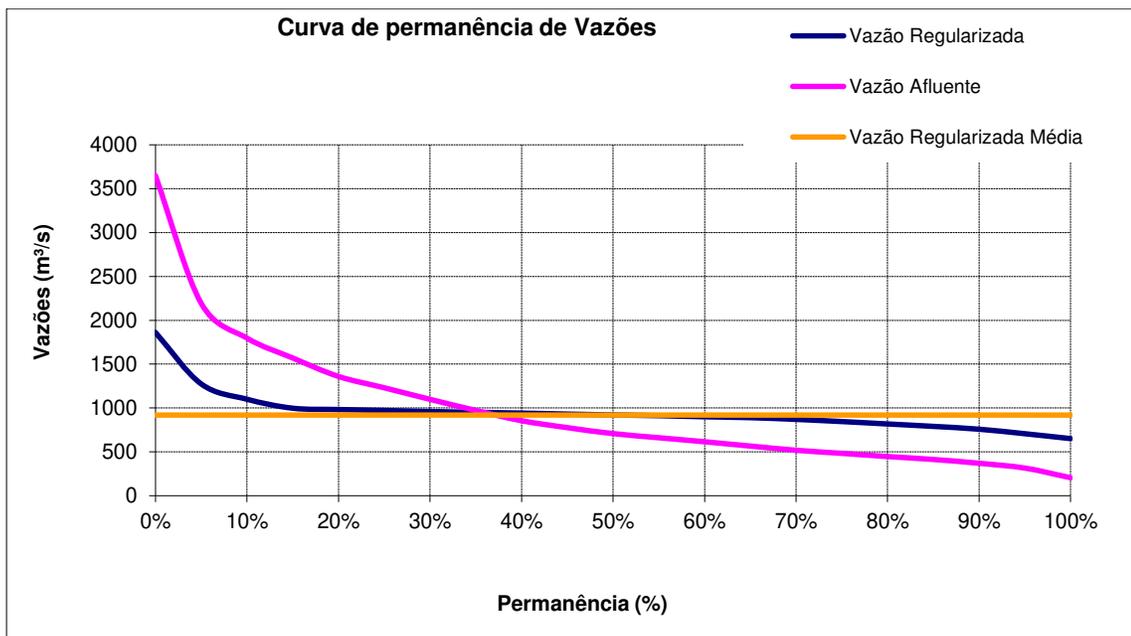


Figura 1.5: Curvas de duração das vazões afluente e regularizada.

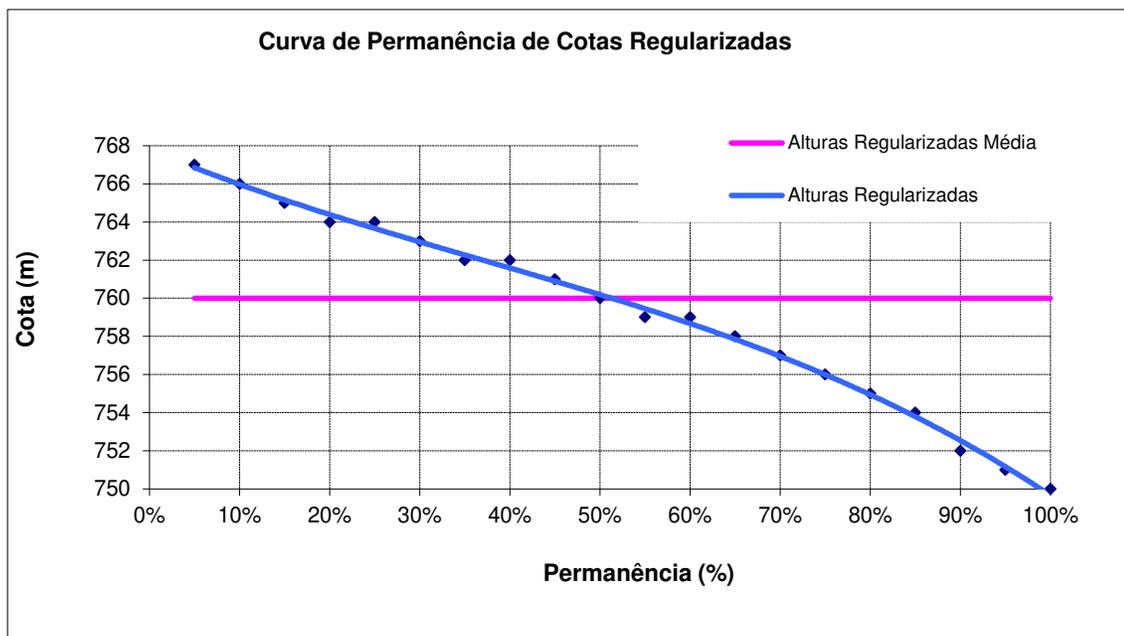


Figura 1.6: Curva de duração do nível do reservatório.

Como pode ser observado, por meio do Método do Conti –Varlet, as vazões regularizadas se aproximam do valor médio, e isso não pode se dizer a respeito do comportamento dos espelhos d’água; assim, a população lindeira sofre, em benefício da de jusante, intensamente com o deplecionamento, não só a intensidade, mas, sobretudo a duração. Caso fosse só a intensidade, a discussão, poderia se concentrar no nível mínimo operativo ( $H_{\min}$ ), procurando elevá-lo.

O gráfico da Figura 1.7 mostra como será a regularização de Furnas, seguindo o critério adotado, e comparando com uma redução do volume útil para 2/3 e 1/3 de seu valor nominal, representando uma elevação no mínimo para 758 m no primeiro caso e 763,5 m no segundo.

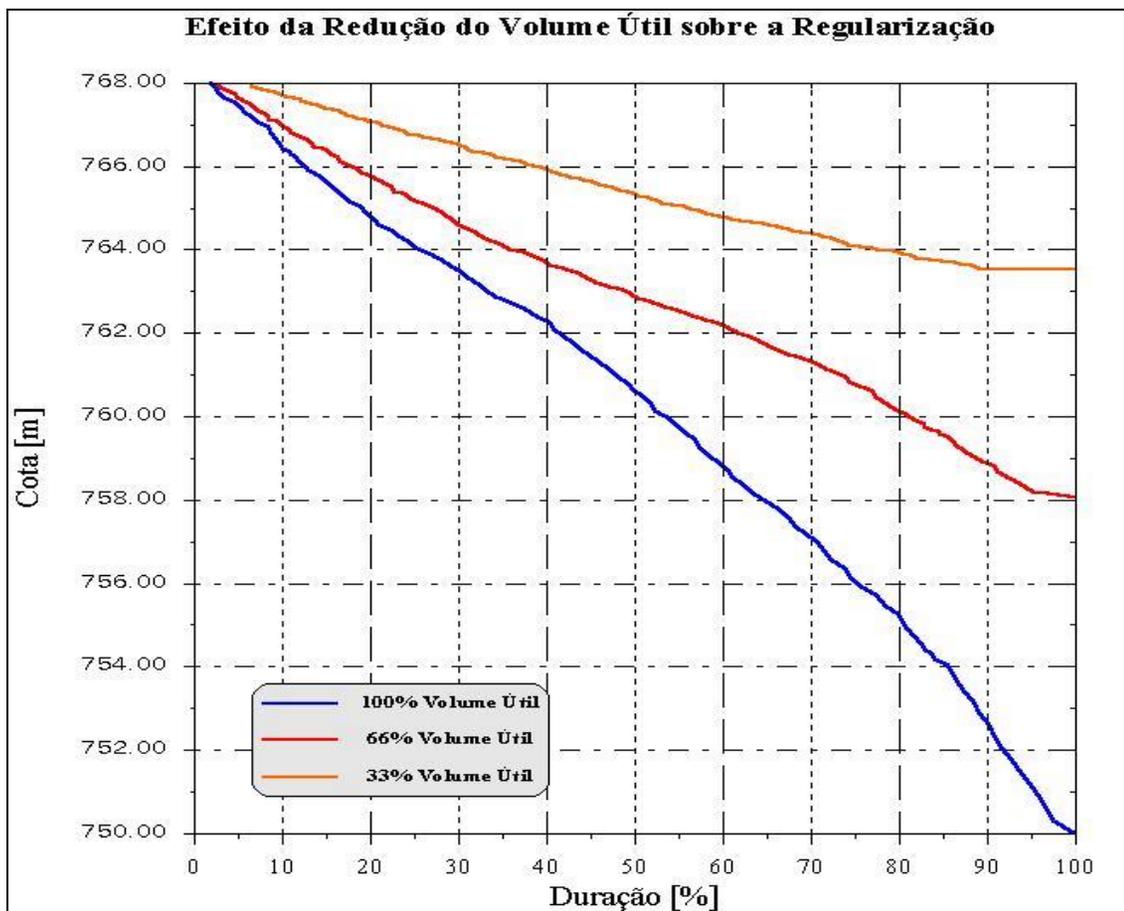


Figura 1.7: Efeito de redução do volume útil sobre a regularização de vazões.

A redução do volume útil seria uma demanda evidente da população local e poderia ser atendida, em certa medida, sem maiores perdas. Lembra-se que a curva cota-volume tem forte concavidade, representando, em seu início menor inclinação, o que leva a significativos ganhos de cota para pequenas perdas de um volume útil. Neste caso, pode ser verificado, que o reservatório teve um rebaixamento superior a 4 m, 75% do tempo, e com a redução de 66% do volume útil, passaria a ter um deplecionamento de 25%. Mas, essa perda pode ser essencial para períodos longos de escassez hídrica. Preferível seria mudar o critério operativo, preservando a parte inferior do volume acumulado apenas para casos extremos.

Propõe-se, então, uma evolução da função objetiva, dada na Equação 1.7, incorporando aí, uma penalização para níveis indesejáveis do reservatório, que poderia ser crescente conforme se desviasse da faixa desejada.

A Figura 1.8 mostra essa curva de penalidade, ressaltando aí, que o fator de punição ( $k_p$ ) cresce tanto para níveis mais baixos, quanto para mais altos, em relação à faixa desejada.

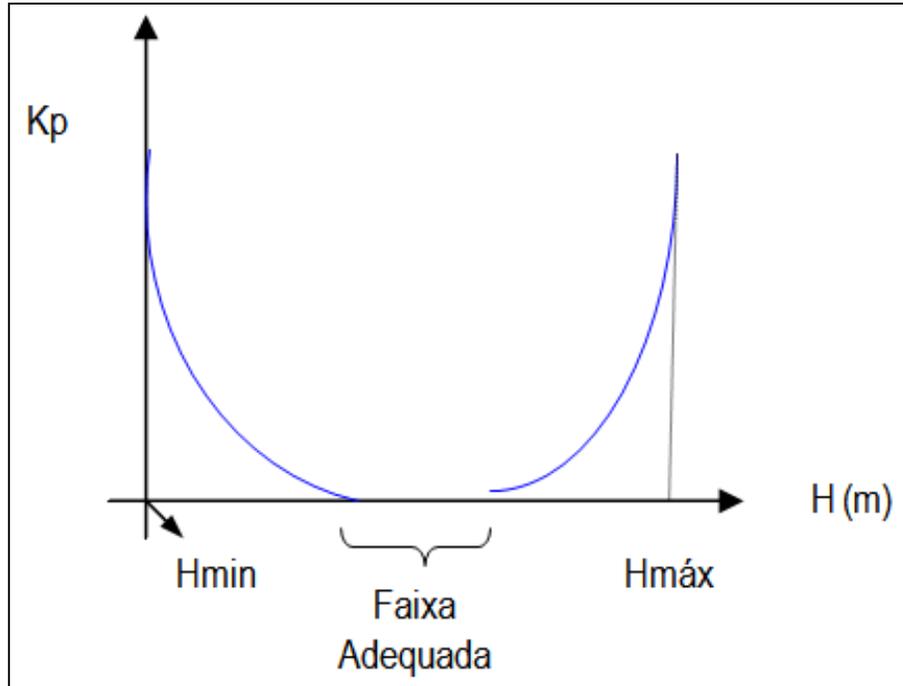


Figura 1.8: Comportamento do fator de punição ( $K_p$ ).

Portanto, a função objetiva evoluiria para:

$$\min z = \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 + k p_i \quad (\text{Equação 1.7})$$

Sujeita às mesmas restrições anteriores, e sabendo que:

$$k p_i = f(H_i) = f(g(VA_i)) \quad (\text{Equação 1.8})$$

Sendo:

$H_i$  é a altura regularizada

Para que se possa ponderar a adequada influência de cada parcela da função objetivo na operação do reservatório, utilizaram-se dois fatores de penalização  $W_1$  e  $W_2$  (Equação 1.9). O uso de

penalidades permitirá que sejam realizadas simulações para diferentes combinações de pesos, objetivando a visualização do efeito na regularização do nível do reservatório.

$$\min z = W_1 \cdot \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 + W_2 \cdot kp_i \quad (\text{Equação 1.9})$$

Os gráficos da Figura 1.9 e Figura 1.10 apresentam as curvas de duração de vazões e cota para uma simulação com diferentes combinações de penalidades  $W_1$  e  $W_2$ , com altura de referência na cota máxima. Observe que quanto menor as penalizações para  $W_1$ , a regularização de vazões vai se perdendo.

Sujeita a:

$$W_1 + W_2 = 1$$

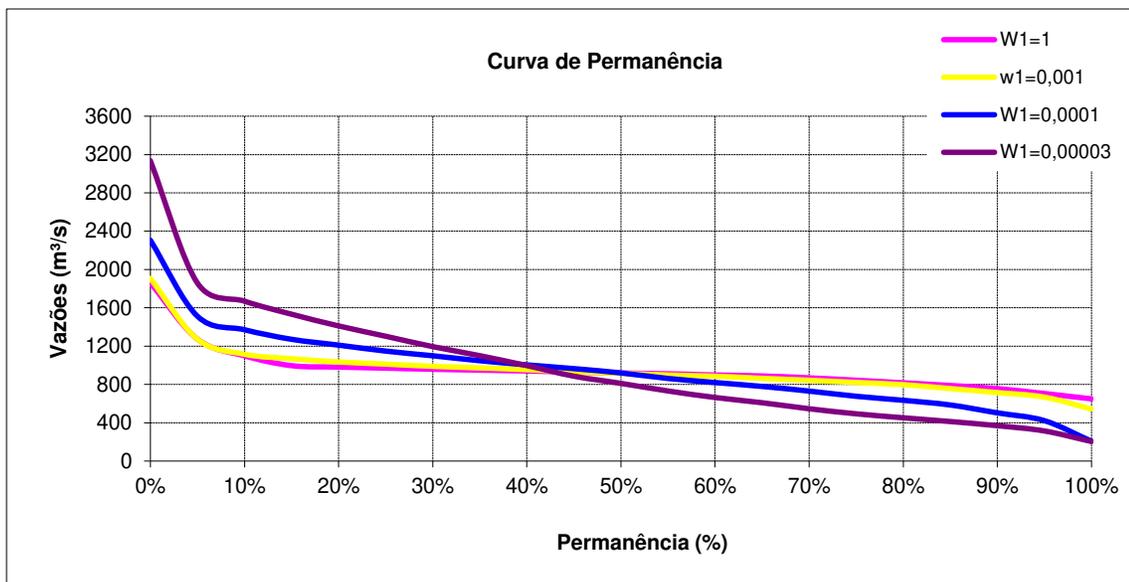


Figura 1.9: Curva de duração de vazão para diferentes penalidades.

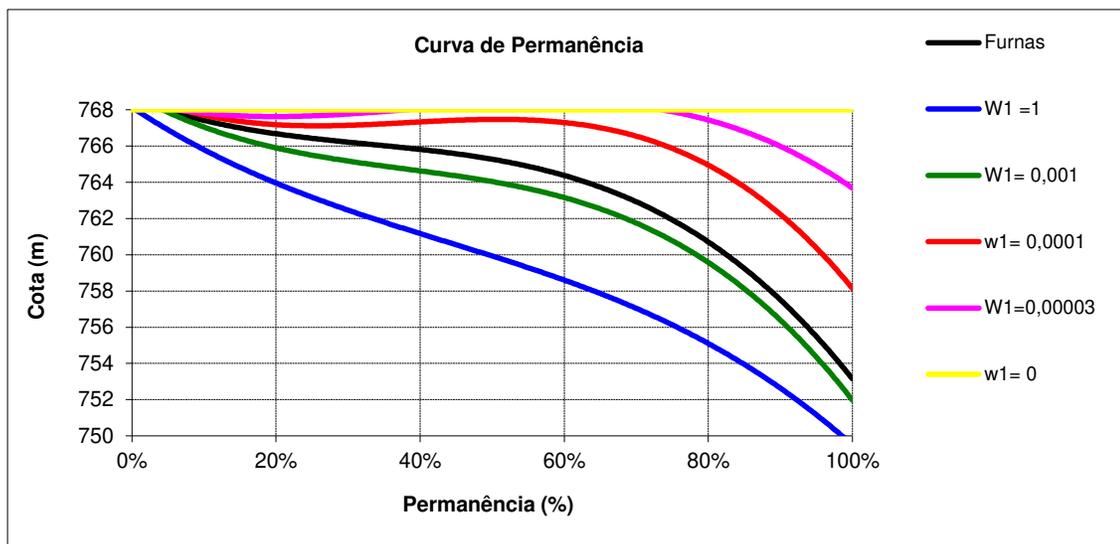


Figura 1.10: Curva de duração de altura para diferentes penalidades.

Uma visão mais aprofundada da realidade local acusa que não só a intensidade do deplecionamento afeta os circunvizinhos do lago. O tempo em que o espelho d'água permanece baixo é, sem sombra de dúvidas, de enorme importância. O caso específico evidencia que a significativa duração de um deplecionamento intenso, chegando a atingir 22 meses consecutivos abaixo da cota 762, é que causou a falência generalizada das pousadas e outras estruturas de turismo. Portanto, a fictícia negociação entre as populações de montante e de jusante da barragem deverá ponderar a regularização para jusante com a intensidade e duração do deplecionamento.

A proposta deste artigo é no sentido de se estabelecer uma "janela móvel", para se obter o nível ponderado nos últimos  $T_j$  meses.  $T_j$  pode ser, por exemplo, um semestre ou um ano. Então, tem-se a revisão da (Equação 1.9, transformando-a em:

$$\min z = \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 + \sum_{j=i-T_j}^i k p_j \quad (\text{Equação 1.10})$$

Mais uma vez, serão utilizados fatores de ponderação, de modo que a Equação 1.7 será contemplada com os ponderadores  $W1$  e  $W3$ . As simulações a seguir visam estabelecer uma análise da influência de cada fator na regularização.

$$\min z = W_1 \cdot \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 + W_3 \cdot \sum_{j=i-T_j}^i k p_j \quad (\text{Equação 1.11})$$

Sujeita a:

$$W_1 + W_3 = 1$$

O efeito da regularização pode ser observado por meio dos gráficos da Figura 1.11 e Figura 1.12, em que se adotou uma penalidade para a duração do deplecionamento cerca de 1000 vezes a parcela dos mínimos quadrados, utilizando-se uma janela móvel de seis meses. Desse modo, o gráfico da Figura 1.11 equivale à regularização utilizando-se exclusivamente o método de Conti-Varlet, sem qualquer penalidade.

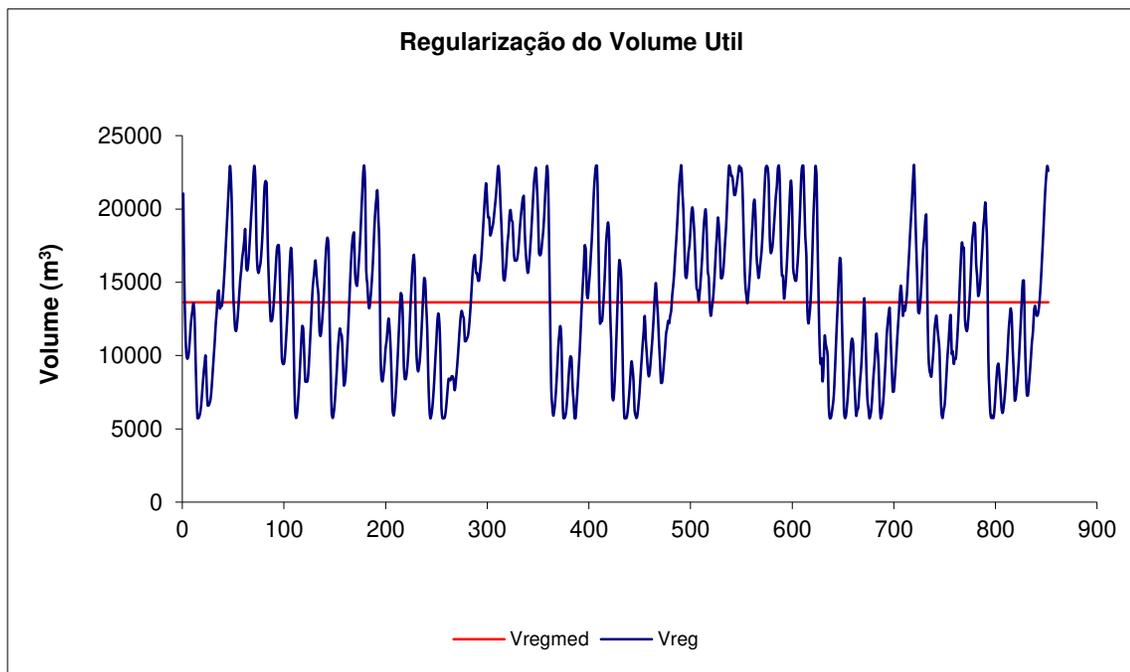


Figura 1.11: Regularização sem efeito de penalidade ao deplecionamento.

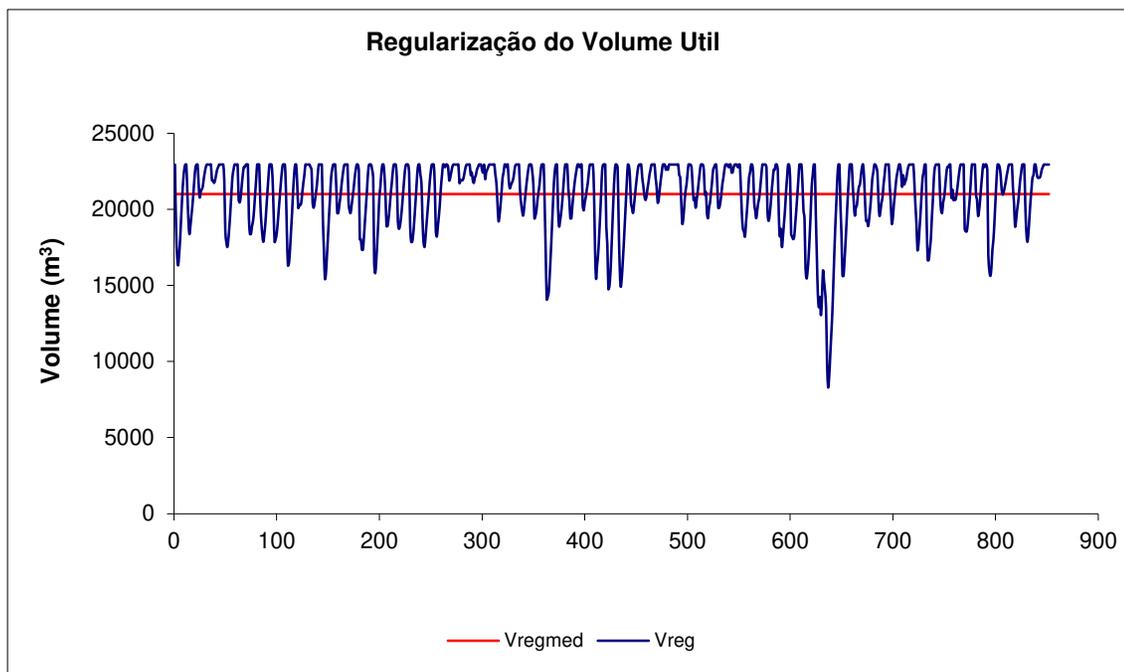


Figura 1.12: Penalidade ao deplecionamento 1000 vezes maior que a da parcela do desvio quadrático.

Os gráficos da Figura 1.13 e Figura 1.14 apresentam o efeito de diferentes penalidades na curvas de duração de vazões e de cota, considerando uma janela móvel semestral, respectivamente, onde se observa que o reservatório permanece com maior regularização de vazões quanto maior for o valor de  $W1$ .

Assim, para  $W1 = 0$ , a vazão regularizada será a mesma da vazão natural. Quando se analisa o efeito sobre as cotas, ocorre justamente o oposto, para menores valores de  $W1$ , implicando maiores penalidades para  $W3$ . Observa-se que o deplecionamento ocorre de maneira pouco intensa, tendendo a regularizar o nível dos reservatórios.

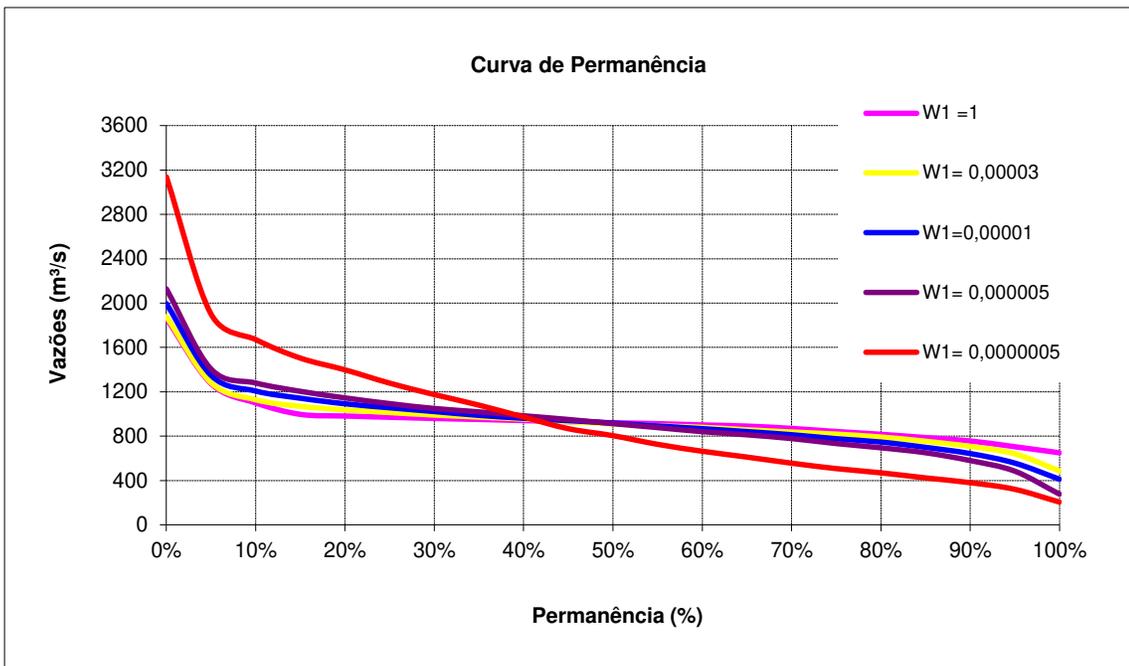


Figura 1.13: Curva de duração de vazões para diferentes penalidades ao deplecionamento.

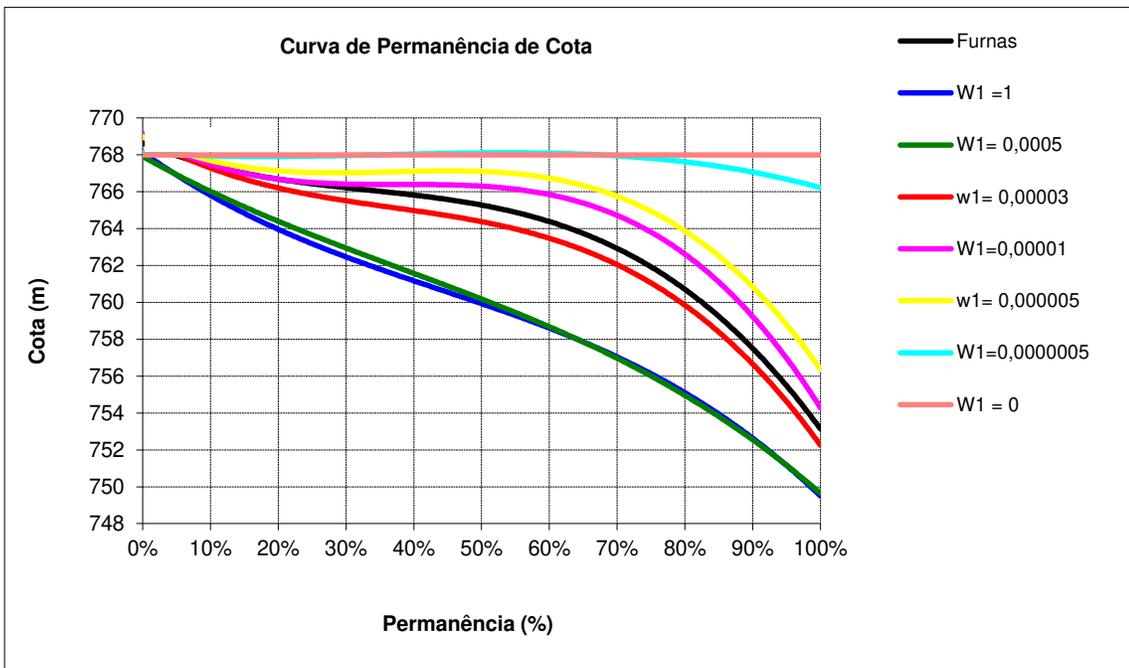


Figura 1.14: Curva de duração de cotas para diferentes penalidades ao deplecionamento.

De maneira elementar, desprezando o efeito sistêmico, poder-se-ia incluir nos debates sobre os diversos interesses a geração de energia elétrica. Simplificadamente, se o objetivo fosse apenas maximizar

a geração no próprio aproveitamento, a estratégia operativa se aproximaria de manutenção do nível em seu valor máximo, obtendo-se máxima potência. Eventualmente, poder-se-ia ter pequenos rebaixamentos para permitir futuras acumulações de água, que, caso contrário, seria vertida, fure a limitação das turbinas. Nota-se assim, que a estratégia de maximização da geração local é muito próxima dos interesses da população vizinha ao lago, não sendo, em princípio, necessário incorporar tal interesse na função objetivo. Basta ponderá-lo junto com a aversão ao deplecionamento.

Como ilustração, os dados da Tabela 1.1 apresentam a geração média anual, para cada caso aqui simulado. Deve ser ressaltado, que conforme citado anteriormente, não será foco desse trabalho, a questão energética, como também seu efeito sobre o SIN. No entanto, pode ser observado que em grande parte dos casos, houve um ganho considerável de energia.

Tabela 1.1: Geração média de energia elétrica para diferentes condições operativas.

PESOS		ENERGIA MÉDIA [MW]
W1	W3	
1	0	706.87
0.5	0.5	689.93
0.005	0.995	690.05
0.001	0.999	691,07
0.0005	0.9995	692.55
0.0001	0.9999	703.01
0.00005	0.99995	709.64
0.00003	0.99997	715.62
0.00001	0.99999	729.48
0.000005	0.999995	736.81
0.000001	0.999999	749.10
0.0000005	0.9999995	753.22
0.0000001	0.9999999	756.60
0.00000005	0.99999995	756.75
0	1	757,06

Do ponto de vista sistêmico, há que se considerar que a geração elétrica extrapola os interesses locais. Historicamente, a geração hidrelétrica era responsável por quase a totalidade da produção elétrica,

não havendo complementaridade térmica sensível por falta de capacidade instalada e pelos altos custos. Embora os programas de expansão da capacidade térmica, nos últimos anos, tenham sido um relativo fracasso, não se pode esquecer que hoje se tem uma significativa potência termelétrica. Nos sistemas em que a geração termelétrica é significativa, a hidrogeração funciona na base, não exigindo reservatórios de regularização para fins energéticos. Esse parece ser o caminho para o nosso sistema. Dia a dia a relativa capacidade de regularização diminui com a entrada de novas hidrelétricas associadas a pequenos reservatórios (tempos de estreitamentos relativamente pequenos). Logo, contar com a “automatização” dos reservatórios, para esse fim tem se tornado de menor importância. Necessita-se, sim, de mudanças de critérios na operação eletro-energética, respeitando de forma mais objetiva, os interesses locais, que serão, certamente, impostos por CBHs bem organizados.

Ainda, explorando-se a disputa “Regularização de Vazões x Nível”, pode-se, para diferentes pesos para cada interesse, utilizar-se da técnica de “*trade-off*” para decisão multiobjetivo. Essa técnica é muito utilizada, quando se dispõe de interesses bastante distintos, e quando necessita encontrar um ponto ideal para ser feita a operação; neste caso, seriam os interesses de montante (cotas regularizadas) e os interesses de jusante (regularização de vazões).

No eixo das abscissas encontra-se o desvio padrão normalizado, que equivale à relação: “desvio médio quadrático para média”, relativo à vazão defluente. No eixo de ordenadas, situam-se as relações “desvio médio das alturas pelo nível de referência”.

Obtém-se, assim, o gráfico da Figura 1.15, em que cada ponto corresponde a uma certa ponderação para os distintos objetivos. Destaca-se, aí, a área “do joelho da curva” em que se supõe estarem os pontos mais robustos.

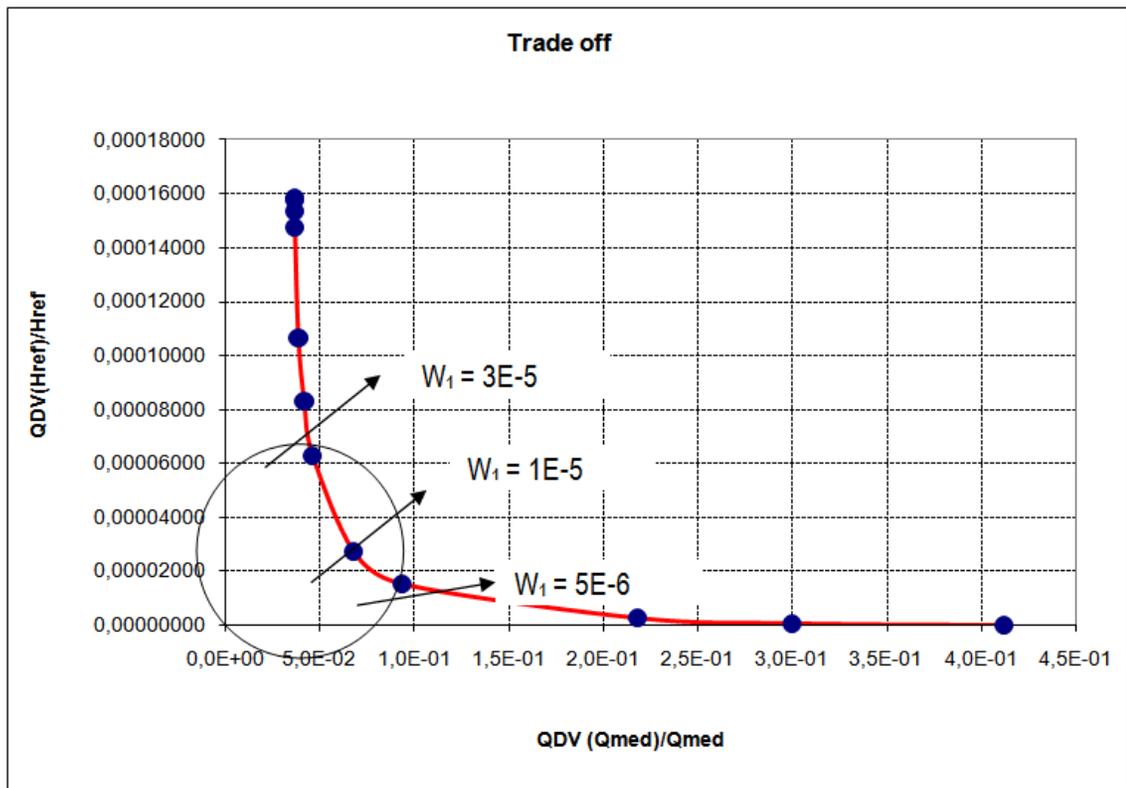


Figura 1.15: Trade-off para decisão multiobjetivo.

Os pontos localizados no "joelho da curva" de "Trade-off" são uma boa estimativa para que se adote as penalizações  $W_1 = 3E-5$ ,  $W_1 = 1E-5$  e  $W_1 = 5E-6$ . Para este caso, pode ser verificado que a cota 762, que até os dias atuais foi mantida no reservatório 75% do tempo, permaneceria 70% no primeiro caso e 90 e 95 % nos demais casos.

Contudo, quando se fala em duração de uma determinada lâmina, não se fala na frequência com a mesma se apresenta. O exemplo prático desse conceito foi o problema enfrentado pelos usuários nos últimos, cinco anos, neste período, a cota requerida pela ASUL, esteve presente apenas 30% do tempo, levando ao caos as atividades socioeconômicas.

Finalmente, desenvolveu-se um estudo que viesse modular o comportamento do reservatório, não somente por baixas durações, mas, sobretudo, pela frequência com que as mesmas apresentam, fazendo-se necessária a definição de algumas variáveis:

Duração (d): representa a quantidade de vezes que ocorrem valores inferiores ao valor referencial.

Frequência (f): representa o número de ciclos (períodos) existentes no hidrograma, que estejam abaixo de um determinado valor.

Duração de transgressão (dt): é a relação existente a Duração (d) e a Frequência (f).

Assim:

$$dt = \frac{d}{f} \quad (\text{Equação 1.12})$$

Frequência de transgressão média ( $\overline{ft}$ ): Relação existente a Frequência (f) e o tamanho da amostra (n):

$$\overline{ft} = \frac{f}{n} \quad (\text{Equação 1.13})$$

Duração máxima: representa o maior período consecutivo de tempo que o reservatório permanece com valores inferiores ao valor referencial.

Duração mínima: Representa o menor período consecutivo de tempo que o reservatório permanece com valores inferiores ao valor referencial.

Constância (C): apresenta a assiduidade com que ocorrem valores inferiores aos valores tidos como referência, A Constância, nada mais representa que um complemento da curva de permanência, e pode ser obtido através da seguinte relação:

$$C = dt \times \overline{ft} = \frac{d}{f} \times \frac{f}{n} = \frac{d}{n} \quad (\text{Equação 1.14})$$

O gráfico da Figura 1.16 exhibe os dados utilizados para aplicação metodológica dos conceitos acima demonstrados.

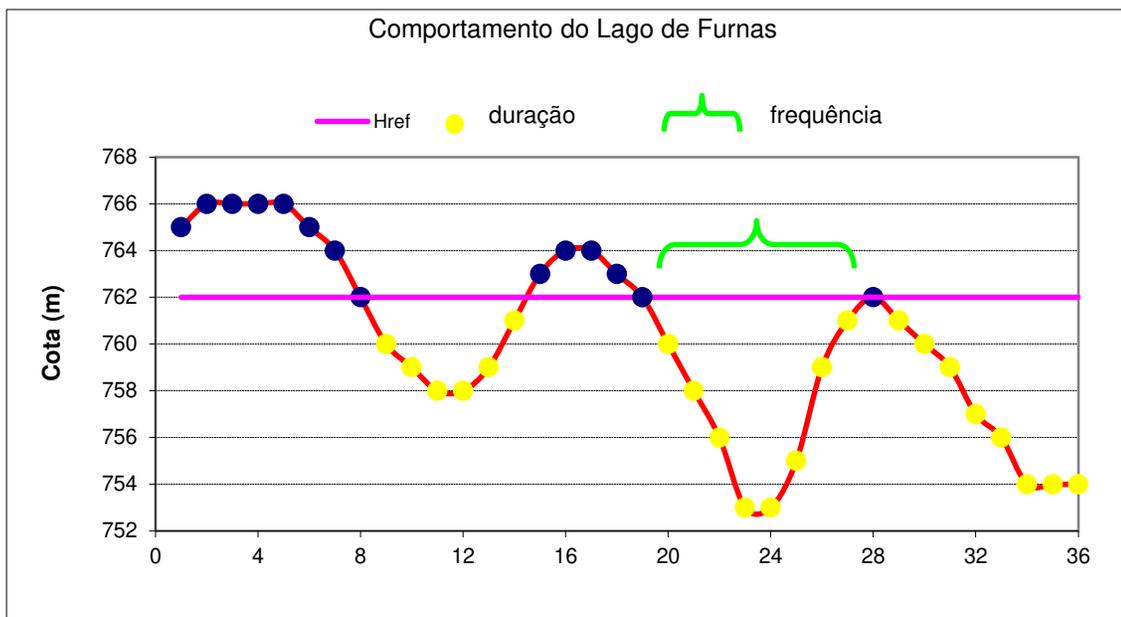


Figura 1.16: Condução do reservatório no período entre 1998 e 2000.

Assim, para o período de 36 meses estudado temos:

Duração ( $d$ ): 22 meses.

Frequência ( $f$ ): 3 períodos.

Duração de transgressão ( $dt$ ):  $dt = \frac{d}{f} = \frac{22}{3} = 7,33$  meses por período.

Frequência de transgressão média ( $\bar{ft}$ ):  $\bar{ft} = \frac{f}{n} = \frac{3}{36} = 0,083$  períodos / meses

Duração máxima: 8 meses.

Duração mínima: 6 meses.

Constância ( $C$ ):  $C = dt \times \bar{ft} = \frac{d}{f} \times \frac{f}{n} = \frac{d}{n} = \frac{22}{36} = 61\%$

A seguir, tem-se uma representação gráfica da metodologia acima desenvolvida, considerando o histórico completo de dados, para cinco situações simuladas: Os três pontos indicados pelo “trade-off”, para o caso onde se deseja maior regularização de vazões ( $W_1= 1$  e  $W_3 =0$ ) e o comportamento real do reservatório. Vale observar, que a simulação feita utilizando o método do Conti – Varlet, apresenta baixos valores para a frequência de transgressão, de cotas mais elevadas, isto ocorre, principalmente devido à grande oscilação do nível do reservatório a qual essa metodologia está exposta.

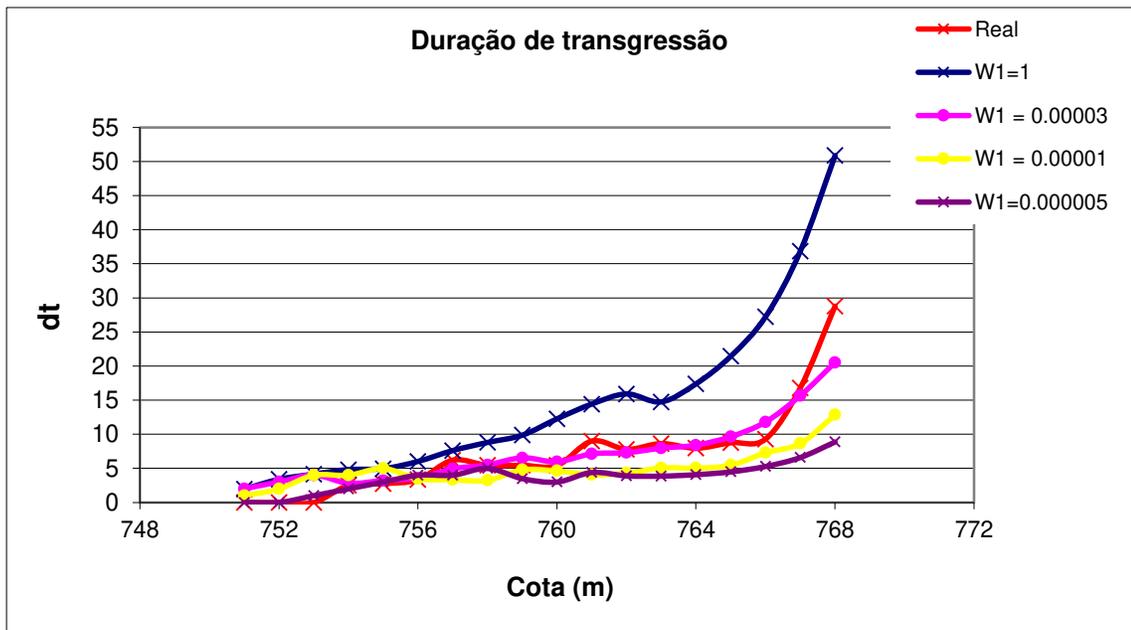


Figura 1.17: Duração de transgressão aplicado para reservatório de Furnas.

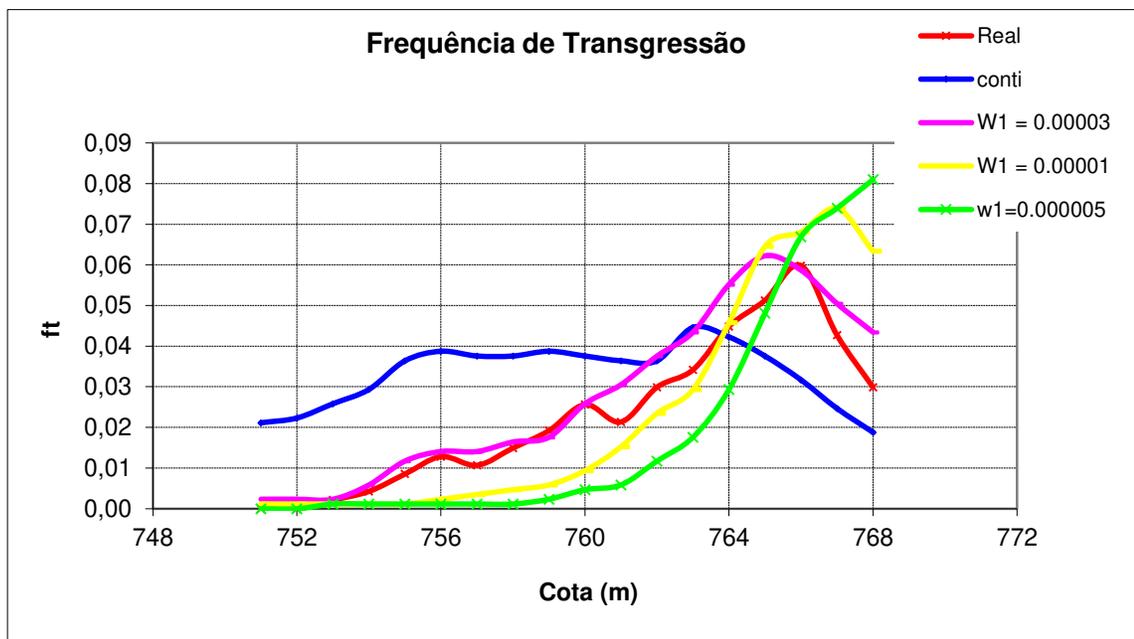


Figura 1.18: Frequência de transgressão aplicado para reservatório de Furnas

Na Tabela 1.2, apresenta-se o resultado da aplicação metodológica, considerando uma variação com patamares de 1 m, desde o nível mínimo, até o nível máximo. Esses dados foram utilizados para que os gráficos acima fossem gerados.

Tabela 1.2: Determinação da duração e frequência de transgressão para os cinco casos estudados.

Real	menor que	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768
	duração	0	0	1	5	11	20	31	38	49	65	90	109	138	167	210	260	336	403
	duração máx.	0	0	1	3	3	7	16	17	17	19	20	22	32	33	55	58	111	206
	duração mín.	0	0	1	2	2	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2	2
	frequência	0	0	1	2	4	6	5	7	9	12	10	14	16	21	24	28	20	14
	dt	0,00	0,00	0,00	2,50	2,75	3,33	6,20	5,43	5,44	5,42	9,00	7,79	8,63	7,95	8,75	9,29	16,80	28,79
	ft	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03
dt.ft	0,00%	0,00%	0,00%	1,07%	2,35%	4,27%	6,62%	8,12%	10,47%	13,89%	19,23%	23,29%	29,49%	35,68%	44,87%	55,56%	71,79%	86,11%	
W <sub>1</sub> = 1	menor que	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768
	duração	35	64	91	120	153	198	243	281	325	392	447	493	560	626	686	735	774	814
	duração máx.	3	5	6	7	10	16	19	21	22	31	45	65	66	100	102	104	128	130
	duração mín.	1	2	1	1	1	1	2	4	1	1	1	1	1	1	1	5	6	5
	frequência	18	19	22	25	31	33	32	32	33	32	31	31	38	36	32	27	21	16
	dt	1,94	3,37	4,14	4,80	4,94	6,00	7,59	8,78	9,85	12,25	14,42	15,90	14,74	17,39	21,44	27,22	36,86	50,88
	ft	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02
dt.ft	4,11%	7,51%	10,68%	14,08%	17,96%	23,24%	28,52%	32,98%	38,15%	46,01%	52,46%	57,86%	65,73%	73,47%	80,52%	86,27%	90,85%	95,54%	
W <sub>1</sub> = 0.00003	menor que	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768
	duração	4	6	8	14	32	43	59	77	98	131	185	233	294	394	511	589	673	759
	duração máx.	2	3	4	6	6	7	7	9	18	19	20	31	31	33	44	46	68	94
	duração mín.	2	3	4	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	2	2	6	5
	frequência	2	2	2	5	10	12	12	14	15	22	26	32	37	47	53	50	43	37
	dt	2,00	3,00	4,00	2,80	3,20	3,58	4,92	5,50	6,53	5,95	7,12	7,28	7,95	8,38	9,64	11,78	15,65	20,51
	ft	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04
dt.ft	0,47%	0,70%	0,94%	1,64%	3,76%	5,05%	6,92%	9,04%	11,50%	15,38%	21,71%	27,35%	34,51%	46,24%	59,98%	69,13%	78,99%	89,08%	
W <sub>1</sub> = 0.00001	menor que	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768
	duração	1	2	4	4	5	7	10	13	24	37	53	86	127	197	301	423	546	694
	duração máx.	1	2	4	4	5	5	6	7	9	10	16	17	18	19	20	21	33	46
	duração mín.	1	2	4	4	5	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3
	frequência	1	1	1	1	1	2	3	4	5	8	13	20	25	39	55	58	63	54
	dt	1,00	2,00	4,00	4,00	5,00	3,50	3,33	3,25	4,80	4,63	4,08	4,30	5,08	5,05	5,47	7,29	8,67	12,85
	ft	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	0,07	0,06
dt.ft	0,12%	0,23%	0,47%	0,47%	0,59%	0,82%	1,17%	1,53%	2,82%	4,34%	6,22%	10,09%	14,91%	23,12%	35,33%	49,65%	64,08%	81,46%	
W <sub>1</sub> = 0.000005	menor que	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768
	duração	0	0	1	2	3	4	4	5	7	12	22	39	58	102	184	301	415	612
	duração máx.	0	0	1	2	3	4	4	5	6	7	10	16	17	18	19	21	21	22
	duração mín.	0	0	1	2	3	4	4	5	1	1	2	1	1	1	1	2	1	3
	frequência	0	0	1	1	1	1	1	1	2	4	5	10	15	25	41	57	63	69
	dt	0,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	4,00	5,00	3,50	3,00	4,40	3,90	3,87	4,08	4,49	5,28	6,59	8,87
	ft	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,07	0,08
dt.ft	0,00%	0,00%	0,12%	0,23%	0,35%	0,47%	0,47%	0,59%	0,82%	1,41%	2,58%	4,58%	6,81%	11,97%	21,60%	35,33%	48,71%	71,83%	

Vale ressaltar que se fosse imposto como política de operação do reservatório, adotando uma Frequência e Duração de transgressão média, o reservatório não iria permanecer tanto tempo com cotas baixas.

Assim, caso fosse necessário adotar uma política de operação, tendo como referência, os pontos previamente sugeridos pelo “*trade-off*”, pode ser verificado que se fosse adotar os fatores  $W_1 = 0.00003$  e  $W_3 = 0.99997$ , não haveria grande alteração no comportamento do reservatório, quando se compara com o que de fato aconteceu, pois ambos apresentam uma duração de transgressão alta, podendo acarretar grandes períodos de estiagem. Já os coeficientes  $W_1 = 0.000005$  e  $W_3 = 0.999995$  demonstram que é possível o lago ficar acima da cota 765, aproximadamente 80% do tempo, ficando cheio praticamente todo período. No entanto, essa prática seria de difícil aplicação, caso ocorresse um período prolongado de vazões afluentes reduzidas.

Desta maneira, ao se adotar as penalizações de  $W_1 = 0.00001$  para o desvio médio quadrático das vazões e  $W_3 = 0.99999$  para a altura, obteve-se uma melhor ponderação dos interesses de todos os usuários. Caso esse sistema tivesse sido implantado em 1963, no caso da cota 762, ter-se-ia:

Frequência de transgressão média ( $\overline{ft}$ ):

$$\overline{ft} = \frac{f}{n} \therefore 0,023 = \frac{f}{468} \therefore f = 11 \text{ Períodos abaixo}$$

Duração de transgressão ( $dt$ ):

$$dt = \frac{d}{f} \therefore 4,30 = \frac{d}{11} \therefore d = 47 \text{ meses}$$

Deve ser observado que caso essa metodologia fosse implementada, o lago teria um comportamento completamente diferente do que realmente aconteceu. Em vez de ficar 109 meses abaixo da cota 762, ficaria apenas 47 meses, garantindo em 90% do tempo lâminas superiores ou iguais a essa. Outro fato a ser considerado é que quando se adota essa regra de manobra, as durações máximas serão amortizadas.

Os gráficos da Figura 1.19 e Figura 1.20 apresentam um paralelo de como foi comportamento do reservatório e como deveria ser, caso as penalizações fossem adotadas.

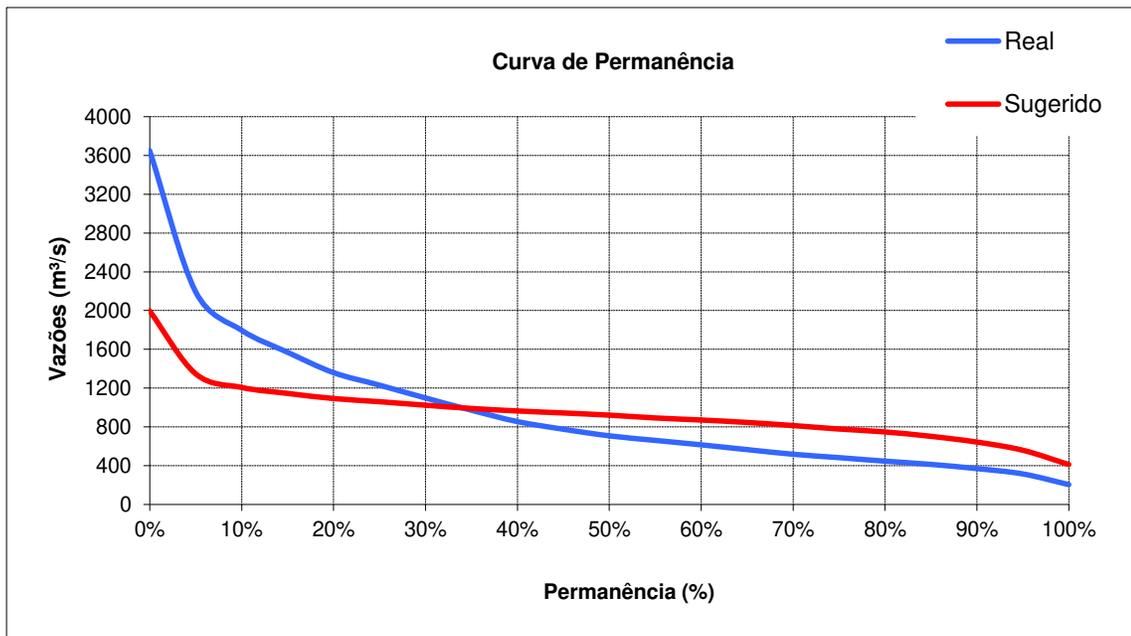


Figura 1.19: Comparação entre as vazões defluentes.

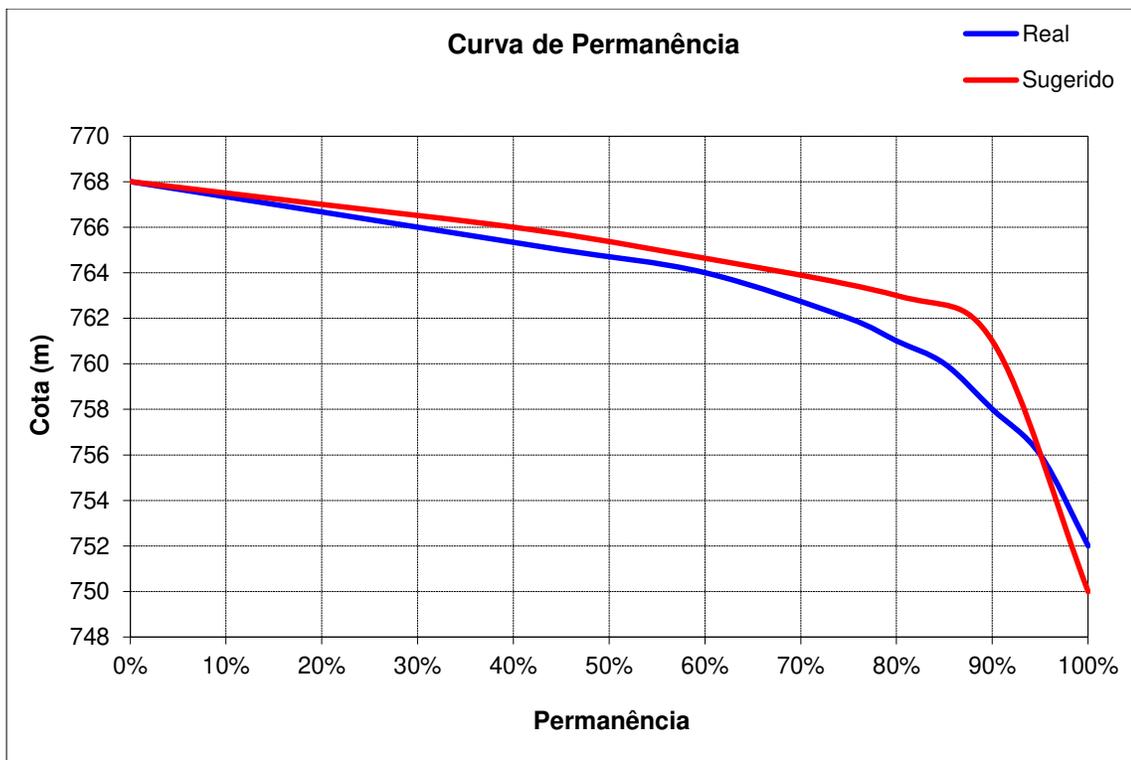


Figura 1.20: Paralelo entre os níveis do reservatório: Caso real e sugerido.

Como as outorgas deverão ser emitidas com prazo máximo de 35 anos, conforme previsto no artigo 16 da Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, utilizando a metodologia aplicada, tem-se:

Frequência de transgressão média ( $\overline{ft}$ ):

$$\overline{ft} = \frac{f}{n} \therefore 0,023 = \frac{f}{35} \therefore f = 1 \text{ Período abaixo}$$

Duração de transgressão ( $dt$ ):

$$dt = \frac{d}{f} \therefore 4,30 = \frac{d}{1} \therefore d = 4,3 \text{ meses}$$

Assim, para os próximos 35 anos, o lago deveria ficar abaixo da cota 762 apenas 4,3 meses em período único.