

IARA WALTER BETTINARDI

**IMPACTOS DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA SOBRE AS
PREVISÕES DE VAZÕES NO SISTEMA INTERLIGADO
SUL/SUDESTE**

CURITIBA

2011

IARA WALTER BETTINARDI

**IMPACTOS DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA SOBRE AS
PREVISÕES DE VAZÕES NO SISTEMA INTERLIGADO
SUL/SUDESTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de Concentração em Engenharia de Recursos Hídricos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Alexandre K. Guetter

CURITIBA

2011

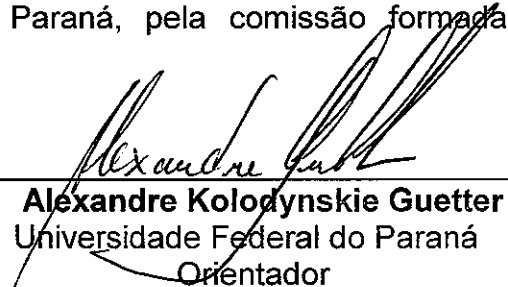
TERMO DE APROVAÇÃO

IARA WALTER BETTINARDI

“IMPACTOS DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA SOBRE AS PREVISÕES DE VAZÕES NO SISTEMA INTERLIGADO SUL/SUDESTE”

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:



Alexandre Kolodynskie Guetter
Universidade Federal do Paraná
Orientador

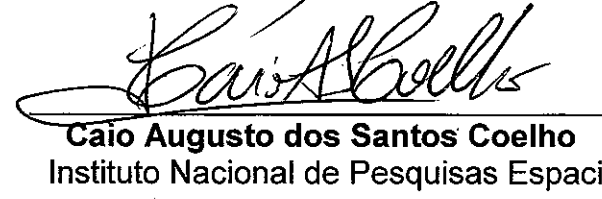
MEMBROS:



Miriam Rita Moro Mine
Universidade Federal do Paraná



Marcelo Rodrigues Bessa
Universidade Federal do Paraná



Caio Augusto dos Santos Coelho
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Curitiba, 18 de fevereiro de 2011

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Alexandre Kolodynskie Guetter, pela dedicação, paciência, incentivos, confiança e ensinamentos que me guiaram na realização deste trabalho.

Aos professores Miriam Rita Moro Mine e Marcelo Rodrigues Bessa, pelo conhecimento e sugestões transmitidos ao longo de todo o curso.

Aos demais professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, pela contribuição em minha formação.

Ao Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho, pelo auxílio e disposição no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca de avaliação, pelos comentários e sugestões.

A Érisen, Daniele e demais amigos, pela amizade, companheirismo e eventuais sugestões que me auxiliaram no decorrer de todo o curso.

Aos colegas de pós-graduação Luísa, Ariane e Peterson, com quem dividi a maior parte das dificuldades e desafios. E aos demais colegas que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, pelo apoio e atenção em questões burocráticas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro através da bolsa de Mestrado.

À Universidade Federal do Paraná, por tornar possível a minha formação como mestre.

Aos meus pais, Edicléa e Maurício, pelo amor incondicional e apoio constantes.

A minha irmã Ioná, pela paciência, sinceridade e encorajamento essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

As minhas amigas Laís, Daniela, Raphaela e Maria Paula, que estiveram presentes nos momentos de alegrias e dúvidas, e cuja amizade indispensável me auxiliou ao longo de todo o curso.

RESUMO

A otimização da geração de energia nos aproveitamentos hidrelétricos do sistema elétrico Brasileiro requer a previsão de vazões afluentes com resolução mensal. Atualmente, aplicam-se procedimentos estocásticos para estimar os cenários de vazões futuras, admitindo-se que todas as seqüências de vazões observadas no passado têm a mesma probabilidade de ocorrer no futuro. O objetivo desse trabalho é avançar sobre o tema da previsão sazonal de vazões, de forma que as vazões futuras passem a ter probabilidades de ocorrência condicionadas pelo estado e processos do sistema climático. A integração das previsões sazonais de chuva produzidas por um conjunto de modelos climáticos dinâmicos e estatísticos é o elemento novo que muda o paradigma atual de isoprobabilidade dos eventos climáticos futuros. Este estudo investiga os índices de acerto das previsões de vazões mensais, com horizonte de três meses, para os principais aproveitamentos hidrelétricos do sistema Sul-Sudeste, com a aplicação de um modelo chuva-vazão que usa a previsão climática de chuva como dado de entrada. As previsões climáticas sazonais de chuva foram fornecidas pela integração das previsões produzidas por dois modelos climáticos de circulação global e por um modelo estatístico produzidas no projeto EUROBRISA. A questão científica que este estudo investiga é se o estado atual da ciência em previsão climática sazonal é adequado para produzir previsões de vazões mensais que sejam úteis para a otimização da geração hidrelétrica. A investigação do índice de acerto das previsões de vazão mensal foi realizada em três aproveitamentos hidrelétricos selecionados para amostrar as principais bacias do sistema elétrico Sul-Sudeste. A análise dos índices de acerto das previsões de vazão foi desenvolvida para o período 1987-2001, em que a versão 2007 do projeto EUROBRISA produziu rodadas longas de previsão climática sazonal de chuva.

Palavras chave: previsão de vazão mensal, previsão de chuva sazonal, chuva-vazão

ABSTRACT

The optimization of energy production in hydroelectric plants of Brazilian electric system needs flow forecasts with month resolution. Nowadays, stochastic methods are applied to estimate scenarios of future flows, assuming that the sequence of observed flows in the past have the same probability of happening in the future. The aim of this work is to advance in the theme of flow's seasonal forecast, in such a way that the future flows have the occurrence probability conditioned by the state and processes of climatic system. The integration of rainfall seasonal forecasts produced by a group of dynamic and statistical climatic models is the new element that changes the present paradigm of isoprobability in future climatic events. This work investigates the levels of accuracy of month flow forecasts, with horizon of three months, to the main hydroelectric plants of south/south-east system, applying a rainfall-runoff model that uses rainfall climate predictions as input data. The rainfall seasonal climate predictions were given by the EUROBRISA project and they were made through the integration of predictions from two climate models of global circulation and one statistical model. The scientific question investigated by this study is whether the current state of science in seasonal climate prediction is appropriate to produce useful month flow predictions to the optimization of hydroelectric generation. The investigation of month flow prediction's accuracy was made in three hydroelectric plants which were selected to represent the main hydrologic basin of Brazil's south/south-east electric system. The accuracy analysis in flow predictions was developed to the period 1987 – 2001, when the 2007 version of EUROBRISA project produced long series of seasonal climate predictions data.

Key words: month flow predictions, seasonal rainfall predictions, rainfall-runoff

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Anomalia média da previsão sazonal de chuva	20
FIGURA 2.2 – Probabilidade de que a chuva sazonal prevista esteja em um tercil	21
FIGURA 2.3 – Previsão da chuva sazonal em categorias variando entre seco e úmido	22
FIGURA 2.4 – Probabilidade da previsão da chuva sazonal ser acima da média.....	23
FIGURA 2.5 – Probabilidade da chuva sazonal prevista estar no tercil inferior	24
FIGURA 2.6 – Probabilidade da chuva sazonal prevista estar no tercil superior	25
FIGURA 2.7 – Probabilidade da chuva sazonal prevista estar no quintil inferior	26
FIGURA 2.8 – Probabilidade da chuva sazonal prevista estar no quintil superior	27
FIGURA 3.1 – Localização dos aproveitamentos hidrelétricos selecionados	35
FIGURA 3.2 – Localização das usinas de Furnas e Emborcação com relação às demais usinas integrantes do SIN no Sistema Sudeste	36
FIGURA 3.3 – Localização da usina de Foz do Areia com relação às demais usinas integrantes do SIN no Sistema Sul	37
FIGURA 3.4 – Média de longo termo das vazões naturais mensais nos aproveitamentos de Furnas e Água Vermelha (Bacia do Grande).....	41
FIGURA 3.5 – Média de longo termo das vazões naturais mensais nos aproveitamentos de Foz do Areia e Salto Caxias (Bacia do Iguaçu)	42
FIGURA 3.6 – Parcelas das vazões incrementais para alguns aproveitamentos hidrelétricos do SIN durante o mês de janeiro.....	43
FIGURA 3.7 – Parcelas das vazões incrementais para alguns aproveitamentos hidrelétricos do SIN durante o mês de outubro	43
FIGURA 3.8 – Esquematização dos possíveis pontos de grade selecionados para cada aproveitamento hidrelétrico	48
FIGURA 3.9 – Aproveitamentos hidrelétricos, bacias incrementais, estações pluviométricas e pontos de previsão de chuva	50
FIGURA 3.10 – Estrutura do modelo 3R.....	54
FIGURA 4.1 – Ciclo anual dos deflúvios para o Rio Grande em Furnas	70
FIGURA 4.2– Variabilidade interanual dos deflúvios em mm/ano para o Rio Grande em Furnas.....	72
FIGURA 4.3 – Variabilidade interanual dos deflúvios em mm/mês para o Rio Grande em Furnas no período 1987 – 2001	73
FIGURA 4.4 – Valores de chuva observada e chuva prevista para o aproveitamento de Furnas (período 1987 – 2001).....	74
FIGURA 4.5 – Frequência acumulada das precipitações observada e prevista em resolução trimestral em Furnas	76
FIGURA 4.6 – Variação da água no solo para a chuva estimada com três pluviômetros em Furnas, aplicando-se três diferentes coeficientes para a correção da evapotranspiração potencial (1,0; 1,2 e 1,4)	77
FIGURA 4.7 – Intercomparação da variação da água no solo para a chuva dos pluviômetros e chuva prevista em Furnas	78
FIGURA 4.8– Comparação das vazões modelada e observada produzidas pelo modelo 3R calibrado com a chuva de pluviômetros em Furnas.....	81
FIGURA 4.9 – Variabilidade do armazenamento nas camadas inferior e superior do solo simuladas pelo modelo 3R calibrado com a chuva de pluviômetros em Furnas.....	82

FIGURA 4.10 – Período do armazenamento máximo (azul) e mínimo (vermelho) de cada ano na camada superior do solo.....	82
FIGURA 4.11 – Período do armazenamento máximo (azul) e mínimo (vermelho) de cada ano na camada inferior do solo.....	82
FIGURA 4.12 – Simulação do escoamento superficial e de base produzidos pelo modelo 3R calibrado com a chuva de pluviômetros em Furnas.....	83
FIGURA 4.13 – Comparação da soma do escoamento superficial e de base simulados sem propagação e com propagação de cheias para 1987-2001 em Furnas	84
FIGURA 4.14 – Comparação da soma do escoamento superficial e de base simulados sem propagação e com propagação de cheias para 1991-1993 em Furnas	84
FIGURA 4.15 – Comparação entre as vazões observadas e simuladas para o período úmido (1991-1993) em Furnas.....	85
FIGURA 4.16 – Comparação entre as vazões observadas e simuladas para o período seco (2000-2001) em Furnas.....	85
FIGURA 4.17 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 1 mês em Furnas	87
FIGURA 4.18 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 2 meses em Furnas	88
FIGURA 4.19 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 3 meses em Furnas	88
FIGURA 4.20 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 1 mês em Furnas	90
FIGURA 4.21 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 2 meses em Furnas	90
FIGURA 4.22 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 3 meses em Furnas	91
FIGURA 4.23 – Gráfico de correlação entre anomalias observadas e previstas de chuva em Furnas.....	92
FIGURA 4.24 – Gráfico de correlação entre anomalias observadas e previstas de vazão em Furnas.....	94
FIGURA 4.25 – Ciclo anual dos deflúvios para o Rio Paranaíba em Emborcação	95
FIGURA 4.26 – Variabilidade interanual dos deflúvios em mm/ano para o Rio Paranaíba em Emborcação	96
FIGURA 4.27 – Variabilidade interanual dos deflúvios em mm/mês para o Rio Paranaíba em Emborcação no período 1987 – 2001	97
FIGURA 4.28 – Valores de chuva observada e chuva prevista em resolução trimestral para o aproveitamento de Emborcação (período 1987 – 2001).....	98
FIGURA 4.29 – Frequência acumulada das precipitações observada e prevista em resolução trimestral em Emborcação	99
FIGURA 4.30 – Variação da água no solo para a chuva estimada com pluviômetros em Emborcação, aplicando-se três diferentes coeficientes para a correção da evapotranspiração potencial (1,0; 1,2 e 1,4).....	100
FIGURA 4.31 – Comparação da variação da água no solo para a chuva observada nos pluviômetros e a chuva prevista em Emborcação.....	100
FIGURA 4.32– Comparação das vazões modelada e observada produzidas pelo modelo 3R calibrado com a chuva de pluviômetros em Emborcação.....	102
FIGURA 4.33 – Variabilidade do armazenamento nas camadas inferior e superior do solo simuladas pelo modelo 3R calibrado com a chuva de pluviômetros em Emborcação	103

FIGURA 4.34 – Período do armazenamento máximo (azul) e mínimo (vermelho) de cada ano na camada superior do solo.....	103
FIGURA 4.35 – Período do armazenamento máximo (azul) e mínimo (vermelho) de cada ano na camada inferior do solo.....	104
FIGURA 4.36 – Simulação do escoamento superficial e de base produzidos pelo modelo 3R calibrado com a chuva de pluviômetros em Emborcação.....	104
FIGURA 4.37 – Comparação da soma do escoamento superficial e de base simulados sem propagação e com propagação de cheias para 1987-2001 em Emborcação.....	105
FIGURA 4.38 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 1 mês em Emborcação.....	107
FIGURA 4.39 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 2 meses em Emborcação.....	107
FIGURA 4.40 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 3 meses em Emborcação.....	108
FIGURA 4.41 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 1 mês em Emborcação.....	109
FIGURA 4.42 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 2 meses em Emborcação.....	110
FIGURA 4.43 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 3 meses em Emborcação.....	110
FIGURA 4.44 – Gráfico de correlação entre anomalias observadas e previstas de chuva em Emborcação.....	111
FIGURA 4.45 – Gráfico de correlação entre anomalias observadas e previstas de vazão em Emborcação.....	112
FIGURA 4.46 – Ciclo anual dos deflúvios para o Rio Iguazu em Foz do Areia.....	113
FIGURA 4.47 – Variabilidade interanual dos deflúvios em mm/ano para o Rio Iguazu em Foz do Areia.....	114
FIGURA 4.48 – Variabilidade interanual dos deflúvios em mm/mês para o Rio Iguazu em Foz do Areia no período 1987 – 2001.....	115
FIGURA 4.49 – Valores de chuva observada e chuva prevista em resolução trimestral para o aproveitamento de Foz do Areia (período 1987 – 2001).....	116
FIGURA 4.50 – Frequência acumulada das precipitações observada e prevista em resolução trimestral em Foz do Areia.....	117
FIGURA 4.51 – Variação da água no solo para a chuva estimada com pluviômetros em Foz do Areia, aplicando-se três diferentes coeficientes para a correção da evapotranspiração potencial (1,0; 1,2 e 1,4).....	117
FIGURA 4.52 – Comparação da variação da água no solo para a chuva observada nos pluviômetros e a chuva prevista em Foz do Areia.....	119
FIGURA 4.53 – Comparação da variação da água no solo para a chuva observada nos pluviômetros, a chuva observada do GPCP e a chuva prevista em Foz do Areia.....	119
FIGURA 4.54 – Comparação das vazões modelada e observada produzidas pelo modelo 3R calibrado com a chuva de pluviômetros em Foz do Areia.....	121
FIGURA 4.55 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 1 mês em Foz do Areia.....	123
FIGURA 4.56 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 2 meses em Foz do Areia.....	123
FIGURA 4.57 – Comparação das vazões observadas e previstas com horizonte de previsão de 3 meses em Foz do Areia.....	124

FIGURA 4.58 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 1 mês em Foz do Areia	125
FIGURA 4.59 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 2 meses em Foz do Areia.....	125
FIGURA 4.60 – Comparação das vazões modeladas e previstas com horizonte de previsão de 3 meses em Foz do Areia.....	126
FIGURA 4.61 – Gráfico de correlação entre anomalias observadas e previstas de chuva em Foz do Areia.....	127
FIGURA 4.62 – Gráfico de correlação entre anomalias observadas e previstas de vazão em Foz do Areia.....	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Aproveitamentos hidrelétricos selecionados para a modelagem chuva-vazão	35
TABELA 3.2 – Aproveitamentos hidrelétricos, localização e áreas de drenagem	36
TABELA 3.3 – Aproveitamentos hidrelétricos estudados e quantidade mínima de postos pluviométricos selecionados	38
TABELA 3.4 – Estações pluviométricas base e auxiliares selecionadas para os aproveitamentos hidrelétricos estudados	39
TABELA 3.5 – Limites das bacias incrementais dos aproveitamentos selecionados	47
TABELA 3.6 – Pontos da grade de previsão de chuva selecionados para cada aproveitamento hidrelétrico estudado	49
TABELA 3.7 – Identificação e localização dos aproveitamentos	51
TABELA 3.8 – Atributos hidráulicos, hidrológicos e energéticos dos aproveitamentos	51
TABELA 3.9 – Parâmetros da fase bacia do modelo 3R	58
TABELA 3.10 – Parâmetros da fase canal do modelo 3R	58
TABELA 4.1 – Erro médio, desvio padrão e coeficiente de correlação entre chuva observada e chuva prevista para o aproveitamento de Furnas	75
TABELA 4.2 – Parâmetros calibrados do modelo 3R usando-se a chuva dos pluviômetros como dado de entrada para Furnas	79
TABELA 4.3 – Médias dos fluxos observados e simulados anuais para a calibração com chuva estimada por pluviômetros para o período 1987-2001 em Furnas	80
TABELA 4.4 – Estatísticas dos erros das vazões previstas com a chuva do EUROBRISA para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses e 3 meses em Furnas	86
TABELA 4.5 – Estatísticas dos erros das vazões previstas com as vazões modeladas para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses e 3 meses em Furnas	89
TABELA 4.6 – Número de casos existentes nos quadrantes N1 a N4 no gráfico de correlação de previsão de chuva para Furnas	93
TABELA 4.7 – Número de casos existentes nos quadrantes N1 a N4 no gráfico de correlação de previsão de vazão para Furnas	93
TABELA 4.8 – Erro médio, desvio padrão e coeficiente de correlação entre chuva observada e chuva prevista para o aproveitamento de Emborcação	98
TABELA 4.9 – Parâmetros calibrados do modelo 3R usando-se a chuva dos pluviômetros como dado de entrada para Emborcação	101
TABELA 4.10 – Médias dos fluxos observados e simulados anuais para a calibração com chuva estimada por pluviômetros para o período 1987-2001 em Emborcação	102
TABELA 4.11 – Estatísticas dos erros das vazões previstas com a chuva do EUROBRISA para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses e 3 meses em Emborcação	106
TABELA 4.12 – Estatísticas dos erros das vazões previstas com as vazões modeladas para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses e 3 meses em Emborcação	109
TABELA 4.13 – Número de casos existentes nos quadrantes N1 a N4 no gráfico de correlação de previsão de chuva para Emborcação	111
TABELA 4.14 – Número de casos existentes nos quadrantes N1 a N4 no gráfico de correlação de previsão de vazão para Emborcação	112
TABELA 4.15 – Erro médio, desvio padrão e coeficiente de correlação entre chuva observada e chuva prevista para o aproveitamento de Foz do Areia	116

TABELA 4.16 – Parâmetros calibrados do modelo 3R usando-se a chuva dos pluviômetros como dado de entrada em Foz do Areia	120
TABELA 4.17 – Médias dos fluxos observados e simulados anuais para a calibração com chuva estimada por pluviômetros para o período 1987-2001 em Foz do Areia.....	120
TABELA 4.18 – Estatísticas dos erros das vazões previstas com a chuva do EUROBRISA para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses e 3 meses em Foz do Areia.....	122
TABELA 4.19 – Estatísticas dos erros das vazões previstas com as vazões modeladas para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses e 3 meses em Foz do Areia	124
TABELA 4.20 – Número de casos existentes nos quadrantes N1 a N4 no gráfico de correlação de previsão de chuva para Foz do Areia	127
TABELA 4.21 – Número de casos existentes nos quadrantes N1 a N4 no gráfico de correlação de previsão de vazão para Foz do Areia.....	128
TABELA A.1 – Postos pluviométricos situados dentro da área de drenagem incremental do aproveitamento de Furnas	138
TABELA A.2 – Postos pluviométricos situados dentro da área de drenagem incremental do aproveitamento de Emborcação.....	140
TABELA A.3 – Postos pluviométricos situados dentro da área de drenagem incremental do aproveitamento de Foz do Areia	141

LISTA DE SIGLAS

3R – *Rainfall Runoff Routing*

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

ECMWF – *European Centre for Medium-Range and Weather Forecast*

EU – *University of Exeter*

EUROBRISA – *Euro-Brazilian Initiative for Improving South American Seasonal Forecasts*

GPCP – *Global Precipitation Climatology Project*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

Météo-France – *Centre National de Recherches Météorologiques*

MLT – Vazão média de longo termo

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro

PDO – Programa Diário de Operação

PMO – Programa Mensal de Operação

SIN – Sistema Interligado Nacional

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UKMO – *United Kingdom Met Office*

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO AMPLO	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	ORGANIZAÇÃO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1	PREVISÃO DE CHUVA COM MODELOS CLIMÁTICOS DINÂMICOS	19
2.2	PREVISÃO DE VAZÃO SAZONAL	28
2.2.1	<i>Modelos estocásticos.....</i>	28
2.2.2	<i>Modelos estatísticos usando previsão dinâmica de chuva.....</i>	30
2.2.3	<i>Modelo hidrológico 3R com atualização de estados.....</i>	32
2.3	MÉTRICAS DE ACERTO PARA AS PREVISÕES DE VAZÃO	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	ÁREA DE ESTUDO	34
3.2	DADOS	38
3.2.1	<i>Pluviométricos</i>	38
3.2.2	<i>Vazão natural.....</i>	40
3.2.2.1	<i>Análise das vazões naturais para as regiões sul e sudeste</i>	40
3.2.2.2	<i>Manipulação dos dados de vazão natural</i>	44
3.2.3	<i>Evapotranspiração.....</i>	44
3.2.4	<i>Análise de consistência conjunta de chuva, vazão e evapotranspiração</i>	45
3.2.5	<i>Previsão de chuvas sazonais.....</i>	47
3.2.6	<i>Sistema de geração</i>	50
3.3	SOFTWARE “R” DE ANÁLISE ESTATÍSTICA	52
3.4	MODELO HIDROLÓGICO 3R COM ATUALIZAÇÃO DE ESTADOS	53
3.4.1	<i>Modelo chuva-vazão-propagação 3R</i>	53
3.4.1.1	<i>Armazenamentos do modelo 3R</i>	55
3.4.1.2	<i>Fluxos do modelo 3R</i>	55
3.4.1.3	<i>Equações governantes do modelo 3R.....</i>	56
3.4.1.4	<i>Calibração dos parâmetros</i>	59
3.4.2	<i>Modelo estocástico de atualização de estados.....</i>	59
3.4.2.1	<i>Formulação dinâmico-estocástica.....</i>	60
3.4.2.2	<i>Equações de propagação.....</i>	61
3.4.2.3	<i>Equações de atualização</i>	63
3.4.2.4	<i>Modelo de variância dos dados de entrada</i>	65
3.4.2.5	<i>Parametrização dos erros.....</i>	66
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS VAZÕES PREVISTAS	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.1	BACIA DO RIO GRANDE – USINA DE FURNAS.....	70
4.1.1	<i>Variabilidade espaço-temporal das vazões naturais</i>	70
4.1.1.1	<i>Variabilidade sazonal</i>	70
4.1.1.2	<i>Variabilidade interanual</i>	71
4.1.2	<i>Análise da previsão de chuvas</i>	73
4.1.3	<i>Análise da consistência conjunta dos dados mensais</i>	76
4.1.4	<i>Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico 3R.....</i>	78
4.1.5	<i>Análise das previsões.....</i>	85

4.1.5.1	Análise da previsão de vazão	86
4.1.5.2	Análise das previsões de chuva e vazão condicionada aos extremos da estação chuvosa.....	91
4.2	BACIA DO RIO PARANAÍBA – USINA DE EMBORCAÇÃO.....	94
4.2.1	<i>Variabilidade espaço-temporal das vazões naturais</i>	94
4.2.1.1	Variabilidade sazonal	94
4.2.1.2	Variabilidade interanual	95
4.2.2	<i>Análise da previsão de chuvas</i>	97
4.2.3	<i>Análise da consistência conjunta dos dados mensais</i>	99
4.2.4	<i>Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico 3R</i>	101
4.2.5	<i>Análise das previsões</i>	105
4.2.5.1	Análise da previsão de vazão	105
4.2.5.2	Análise das previsões de chuva e vazão condicionada aos extremos da estação chuvosa.....	110
4.3	BACIA DO RIO IGUAÇU – USINA DE FOZ DO AREIA.....	113
4.3.1	<i>Variabilidade espaço-temporal das vazões naturais</i>	113
4.3.1.1	Variabilidade sazonal	113
4.3.2	<i>Variabilidade interanual</i>	114
4.3.3	<i>Análise da previsão de chuvas</i>	115
4.3.4	<i>Análise da consistência conjunta dos dados mensais</i>	117
4.3.5	<i>Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico 3R</i>	119
4.3.6	<i>Análise das previsões</i>	121
4.3.6.1	Análise da previsão de vazão	121
4.3.6.2	Análise das previsões de chuva e vazão condicionada aos extremos do regime anual.....	126
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
	GLOSSÁRIO	135
	ANEXOS	137

1 INTRODUÇÃO

O Operador Nacional do Sistema Elétrico brasileiro (ONS) desenvolve as atividades de programação da operação do Sistema Interligado Nacional – SIN. Atualmente, a programação da geração usa modelos estocásticos e séries de vazões mensais a partir de 1931 para todos os aproveitamentos hidrelétricos do SIN para otimizar a geração de energia elétrica. A otimização da geração é fundamentada na minimização de uma função objetivo relacionada com o custo da energia produzida ao longo de um horizonte de doze meses, sendo atualizada mensalmente. Portanto, a otimização da geração de energia do SIN requer a previsão das afluições nos reservatórios de todas as hidrelétricas, com resolução mensal e horizonte de doze meses. Como no sistema atual se usam as séries históricas de vazões mensais nos aproveitamentos e processos estocásticos para a geração de cenários de vazões futuras, está implícita a hipótese de que todas as seqüências climáticas do passado têm a mesma probabilidade de ocorrer no futuro.

Nas últimas décadas, têm-se observado avanços significativos na previsão de tempo e clima, com a disponibilização operacional de previsões de chuva na escala diária com horizonte de até quinze dias, e previsões climáticas de chuva sazonal com horizonte de até seis meses. A previsão sazonal de chuva pode ser produzida com modelos estatísticos e com modelos dinâmicos do clima. Os modelos estatísticos prevêm a chuva sazonal usando padrões climáticos como variável independente; por exemplo os eventos El Niño-La Niña podem ser usados para a previsão sazonal de chuva nas regiões sul e nordeste do Brasil. Os modelos dinâmicos de circulação global simulam todos os processos físicos da atmosfera e suas interações com os oceanos e continentes, usando como condição de contorno a evolução das temperaturas dos oceanos. Os modelos dinâmicos aplicam os princípios de conservação de massa, energia, quantidade de movimento, termodinâmica da atmosfera e microfísica das nuvens para estimar a chuva futura a partir da condição de contorno que é a evolução das temperaturas dos oceanos durante o horizonte de previsão. Portanto, a previsão de chuva produzida pelos modelos climáticos dinâmicos é decorrente da previsão da circulação atmosférica condicionada pelo estado dos oceanos.

O propósito desse trabalho é o de responder à questão científica: o estado da ciência dos modelos climáticos dinâmicos atuais já é suficiente para produzir previsões sazonais de chuva com precisão suficiente para aumentar a eficiência da programação da

geração hidrelétrica? Caso a resposta seja positiva, então se poderia propor a inclusão das previsões climáticas sazonais de chuva e modelos chuva-vazão para grandes bacias nos procedimentos de previsão de aflúências que se adota para a otimização da geração do SIN. Dessa forma, a inclusão dos processos físicos do sistema climático substituiria o princípio de isoprobabilidade das sequências de vazões históricas para a geração de cenários de vazões futuras.

O estado da arte da previsão climática sazonal de chuva foi definido como sendo a previsão integrada de dois modelos climáticos de circulação global e de um modelo estatístico produzido pelo projeto EUROBRISA. O programa de colaboração multi-institucional EUROBRISA, que significa “A Euro-Brazilian Initiative for Improving South American Seasonal Forecasts”, tem como objetivos: (1) produzir previsões sazonais de chuva e (2) diagnosticar o impacto dessas previsões sobre a produção de energia, agricultura e saúde pública. Nesse estudo foi usada a previsão climática sazonal integrada do projeto EUROBRISA para estimar o seu impacto sobre a previsão sazonal de aflúências que condicionam a otimização da geração hidrelétrica. Os aspectos de maior impacto decorrentes do uso da previsão climática sazonal de chuva são a programação energética e o controle de cheias.

As vazões consideradas nesse estudo foram as vazões naturais produzidas pelo ONS, sendo que essas são estimadas a partir das vazões afluentes e defluentes do reservatório e da estimativa da evaporação e usos consuntivos no trecho do rio se o reservatório não existisse. O ONS estima operacionalmente as vazões naturais em todos os aproveitamentos hidrelétricos brasileiros. Para o período 1931 – 2000, elas foram revisadas nos anos de 2002 e 2003 através de um grande projeto realizado por sete grupos/empresas contratados pelo ONS, envolvendo a revisão dos dados e dos procedimentos.

Essa dissertação foi desenvolvida para atender os objetivos do projeto EUROBRISA. Os dados de previsão de chuva fornecidos pelo modelo integrado do EUROBRISA foram utilizados na previsão de vazões, e os índices de acerto em relação às vazões observadas e simuladas pelo modelo hidrológico calibrado com a chuva observada foram analisados.

Este trabalho deve descrever os temas listados abaixo:

- 1) As características da variabilidade anual e interanual das vazões nos aproveitamentos do sistema interligado Sul/Sudeste;
- 2) As previsões climáticas sazonais de chuva produzidas pelo projeto EUROBRISA;

3) A seleção e calibração de um modelo chuva-vazão concentrado para ser aplicado em grandes bacias, de forma a produzir previsões de vazões mensais a partir das previsões de chuva;

4) A caracterização dos índices de acerto das previsões sazonais de chuva e vazão.

1.1 OBJETIVO AMPLO

Nesse estudo se busca quantificar o aumento nos índices de acerto das previsões sazonais de vazão, nos aproveitamentos hidrelétricos da região Sul/Sudeste, usando as previsões sazonais de chuva, produzidas pelos modelos climáticos dinâmicos integrados no projeto EUROBRISA.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

As atividades desenvolvidas atendem aos objetivos específicos abaixo:

1) Descrição da variabilidade sazonal e interanual das vazões naturais reconstituídas nos aproveitamentos hidrelétricos no sistema Sul/Sudeste para o período de 1931 a 2007.

2) Calibração dos parâmetros hidrológicos do modelo chuva-vazão para três grandes bacias das regiões sul e sudeste do Brasil. O modelo chuva-vazão é o modelo hidrológico que calcula a vazão de uma bacia a partir da chuva. A calibração usa como dados de entrada a chuva e evaporação médias mensais na bacia e a vazão natural mensal no aproveitamento hidrelétrico. A calibração consiste na minimização das diferenças entre as vazões modeladas e observadas.

3) Calibração dos parâmetros do modelo de atualização de estados em função das incertezas nos dados de entrada (chuva e evaporação potencial) e nos parâmetros do modelo chuva-vazão.

4) Seleção do sistema de previsão hidrológica mais robusto e adequado para a previsão de vazões mensais;

5) Quantificação dos erros das vazões modeladas a partir da chuva mensal observada em pluviômetros para o período de janeiro de 1987 a dezembro de 2001.

6) Quantificação dos erros nas previsões de vazão usando como dado de entrada a previsão de chuva do modelo integrado do projeto EUROBRISA (período de 1987 a 2001).

7) Caracterização da distribuição espacial dos erros nas previsões de vazão.

1.3 JUSTIFICATIVA

A previsão sazonal das vazões afluentes aos reservatórios permite que se otimize a geração de energia e o controle de cheias, tornando a operação do sistema hidrelétrico mais robusta e eficiente. Atualmente, as vazões previstas são geradas por modelos estocásticos que não levam em conta a dinâmica do clima. Com o uso de previsões de chuva, produzidas pela integração de modelos climáticos dinâmicos e estatísticos, pretende-se diminuir a incerteza na previsão de afluições aos reservatórios, que pode ser aplicada operacionalmente para a otimização da geração hidrelétrica.

1.4 ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, incluindo esta introdução, da forma descrita a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura, a qual aborda temas sobre previsões de chuva e vazão, análise de consistência conjunta de dados e métricas para avaliação de acerto nas previsões de vazão. O Capítulo 3 descreve a área de estudo, os dados de chuva e vazão observados, a estimativa da evapotranspiração, os dados de chuva prevista, o método para realizar a análise de consistência conjunta dos dados, o modelo hidrológico e o modelo de atualização de estados (modelo que compara em tempo real dados observados com dados calculados pelo modelo hidrológico e faz a correção de parâmetros). O Capítulo 4 apresenta a análise dos resultados obtidos para as bacias dos rios Grande, Paranaíba e Iguaçu. O Capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações, com base nos resultados. Ao final estão listadas as referências citadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura foi organizada em quatro blocos. O primeiro apresenta os produtos relacionados ao projeto EUROBRISA e que se referem às previsões dinâmicas de chuva. O segundo bloco trata da previsão de vazões: explica como o ONS faz essas previsões atualmente, apresenta modelo estatístico para manipular dados hidrológicos e possibilitar sua utilização em diferentes escalas espaciais (“down-scaling” espacial), e introduz o modelo hidrológico dinâmico-estocástico 3R. Em seguida, apresenta-se o tópico sobre análise de consistência conjunta de dados e no último bloco são revisadas algumas estatísticas empregadas para avaliar erros.

2.1 PREVISÃO DE CHUVA COM MODELOS CLIMÁTICOS DINÂMICOS

O projeto EUROBRISA é um programa de colaboração multi-institucional entre parceiros brasileiros e europeus para o compartilhamento das previsões climáticas sazonais produzidas pelo *European Centre for Medium-Range and Weather Forecast* (ECMWF, Inglaterra), o *United Kingdom Met Office* (UKMO, Inglaterra), o *Centre National de Recherches Météorologiques* (Météo-France, França) e o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). As instituições que colaboram no EUROBRISA incluem: o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, Brasil), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, Brasil), a Universidade de São Paulo (USP, Brasil), a Universidade Federal do Paraná (UFPR, Brasil), o ECMWF, o UKMO, o Météo-France e a *University of Exeter* (EU, Inglaterra).

As previsões de chuva fornecidas pelo projeto EUROBRISA podem ser visualizadas em mapas disponíveis no *website* do CPTEC (2009). No *website*, são apresentadas previsões do total de chuva acumulada para o próximo trimestre a partir de um determinado mês. Por exemplo, uma previsão com referência ao mês de outubro é válida para os meses seguintes de novembro, dezembro e janeiro (NDJ).

No *website* do CPTEC (2009), na parte referente ao projeto EUROBRISA, encontra-se a descrição das previsões e produtos de verificação da versão mais recente do projeto, os quais se referem a:

- quatro modelos dinâmicos oceano-atmosfera acoplados, que são os System 3 – ECMWF (ANDERSON *et al.*, 2007), GloSea – UKMO (GRAHAM *et al.*, 2005), sistema de

previsão sazonal do Météo-France e sistema de previsão sazonal do CPTEC;

- modelo empírico (COELHO *et al.*, 2006), que usa as temperaturas da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico como variáveis de predição da precipitação sobre a América do Sul;

- previsão integrada (COELHO *et al.*, 2006), que combina e calibra os modelos acoplados e empírico.

Os produtos de previsão (mapas) fornecidos pelo *website* são os seguintes:

a) Anomalia média da previsão de chuva sazonal: É um mapa que indica os locais com chuvas acima ou abaixo da média sazonal. Anomalias positivas são representadas pela gama de tonalidades azuis e anomalias negativas pelas cores variando entre amarela, laranja e vermelha.

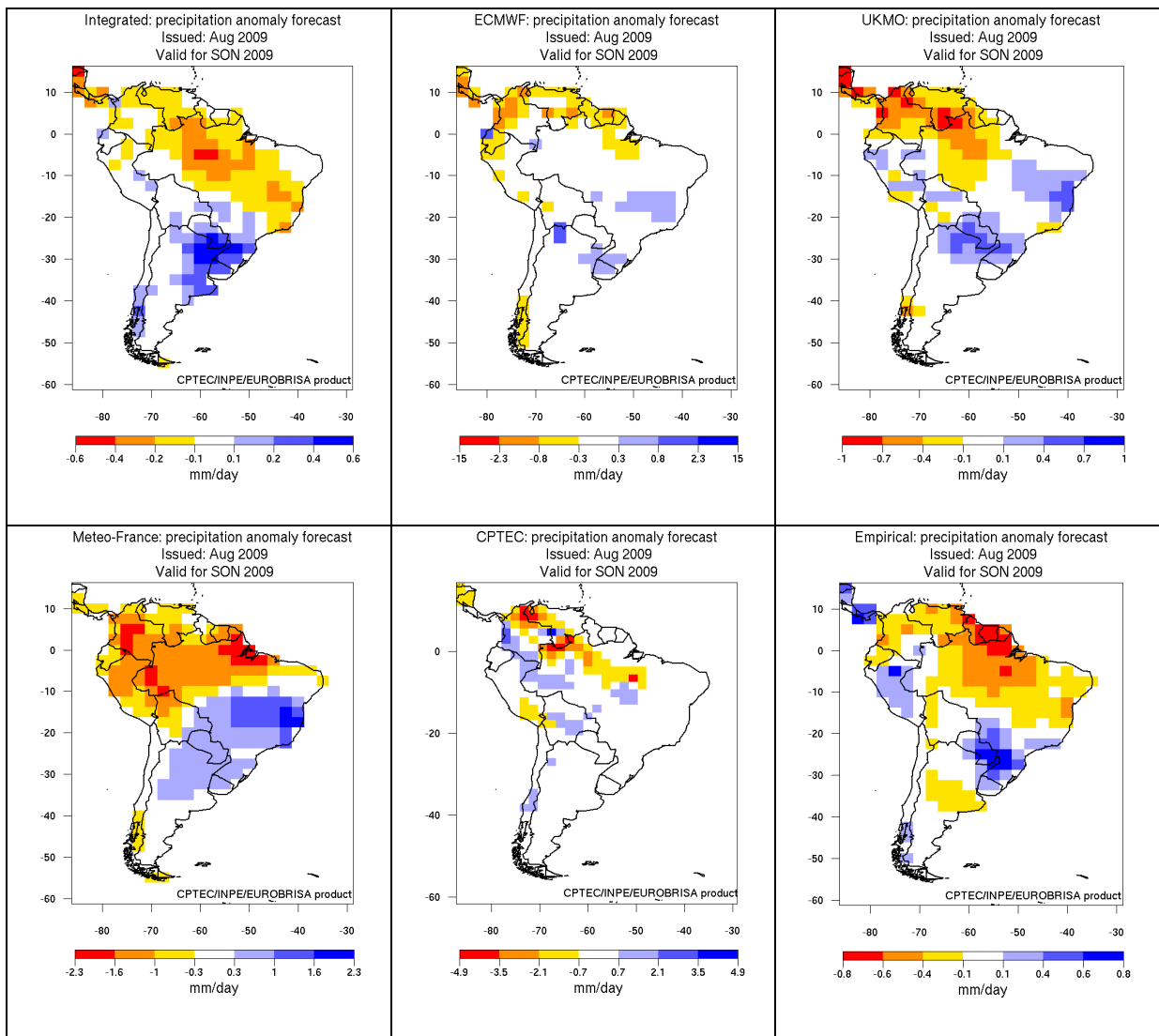


FIGURA 2.1 – ANOMALIA MÉDIA DA PREVISÃO SAZONAL DE CHUVA

FONTE: CPTEC (2009)

b) Probabilidade da chuva sazonal prevista estar em um dos tercis da distribuição: As categorias de tercil inferior, central e superior são determinadas usando a distribuição da chuva sazonal a partir dos dados do GPCP (*Global Precipitation Climatology Project; ADLER et al., 2003*). Esse mapa mostra a probabilidade da chuva sazonal prevista para cada um dos tercis. As tonalidades de azul indicam maiores probabilidades que a chuva prevista esteja no tercil superior (mais úmido que as condições normais). As tonalidades de vermelho, laranja e amarelo indicam maiores probabilidades de que a chuva prevista esteja no tercil inferior. A cor branca indica que a chuva prevista ficará no tercil central (condições normais).

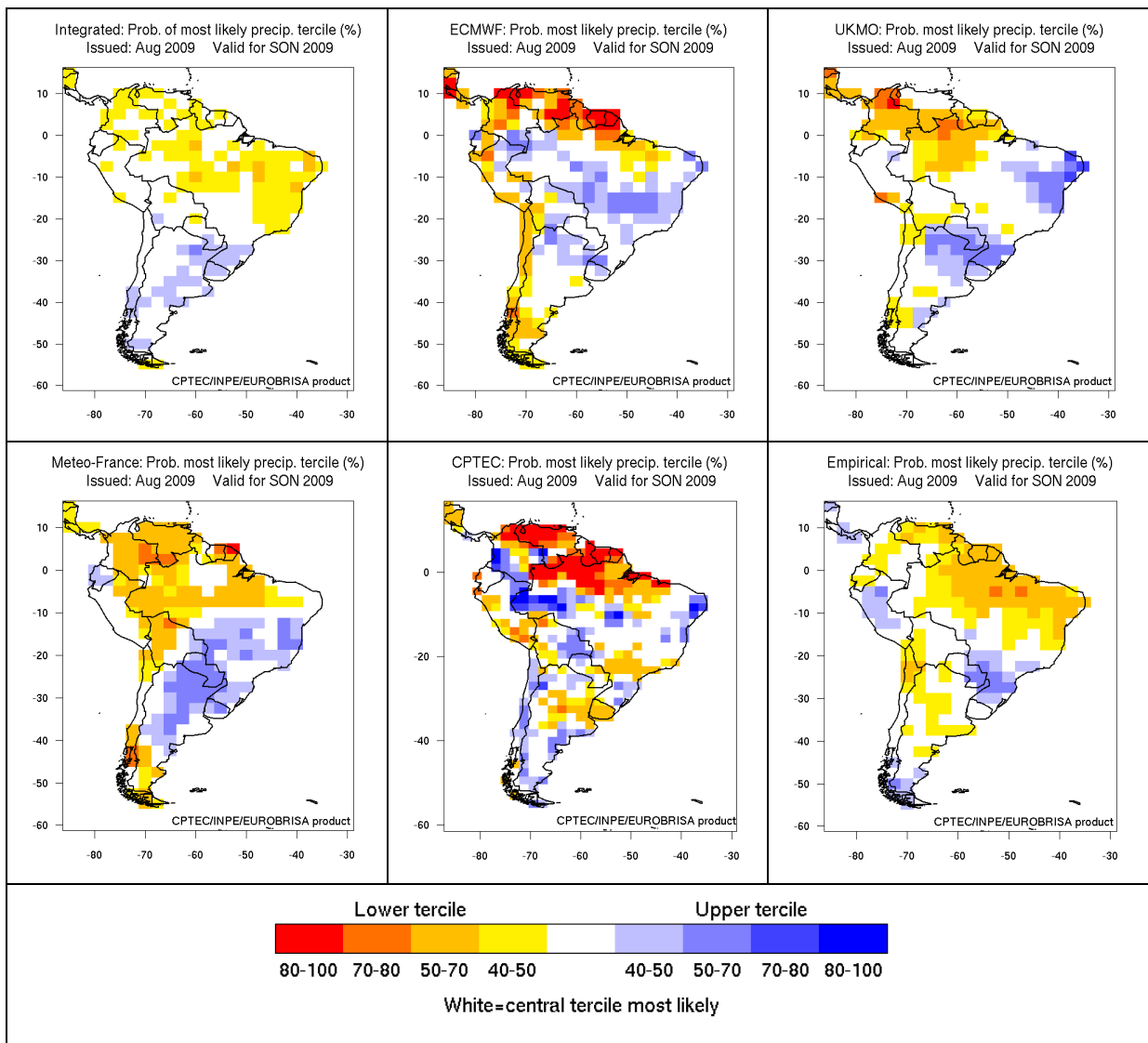


FIGURA 2.2 – PROBABILIDADE DE QUE A CHUVA SAZONAL PREVISTA ESTEJA EM UM TERCIL

FONTE: CPTEC (2009)

c) Previsão em categorias: Denotando por B, N e A os valores de probabilidade para os tercís inferior, central e superior, respectivamente; as categorias de previsão são:

- seco: representado pela cor vermelha, ocorre quando $A < 33,3\%$, $N < 33,3\%$ e $B > 40\%$, indicando maior probabilidade para o tercís inferior;

- seco ou média: em laranja, ocorre quando $B > 40\%$ e $N > 33,3\%$, ou $B > 33,3\%$ e $N > 40\%$, indicando maior probabilidade para os tercís inferior e central;

- média: representado pela cor branca, ocorre quando $A < 33,3\%$, $N > 40\%$ e $B < 33,3\%$, ou seja, quando há maior probabilidade para o tercís central;

- úmido ou média: representado em azul claro, ocorre quando $A > 40\%$ e $N > 33,3\%$ ou $A > 33,3\%$ e $N > 40\%$, indicando maior probabilidade para os tercís superior e central;

- úmido: em azul escuro, ocorre quando $A > 40\%$, $N < 33,3\%$ e $B < 33,3\%$, indicando maior probabilidade para o tercís superior.

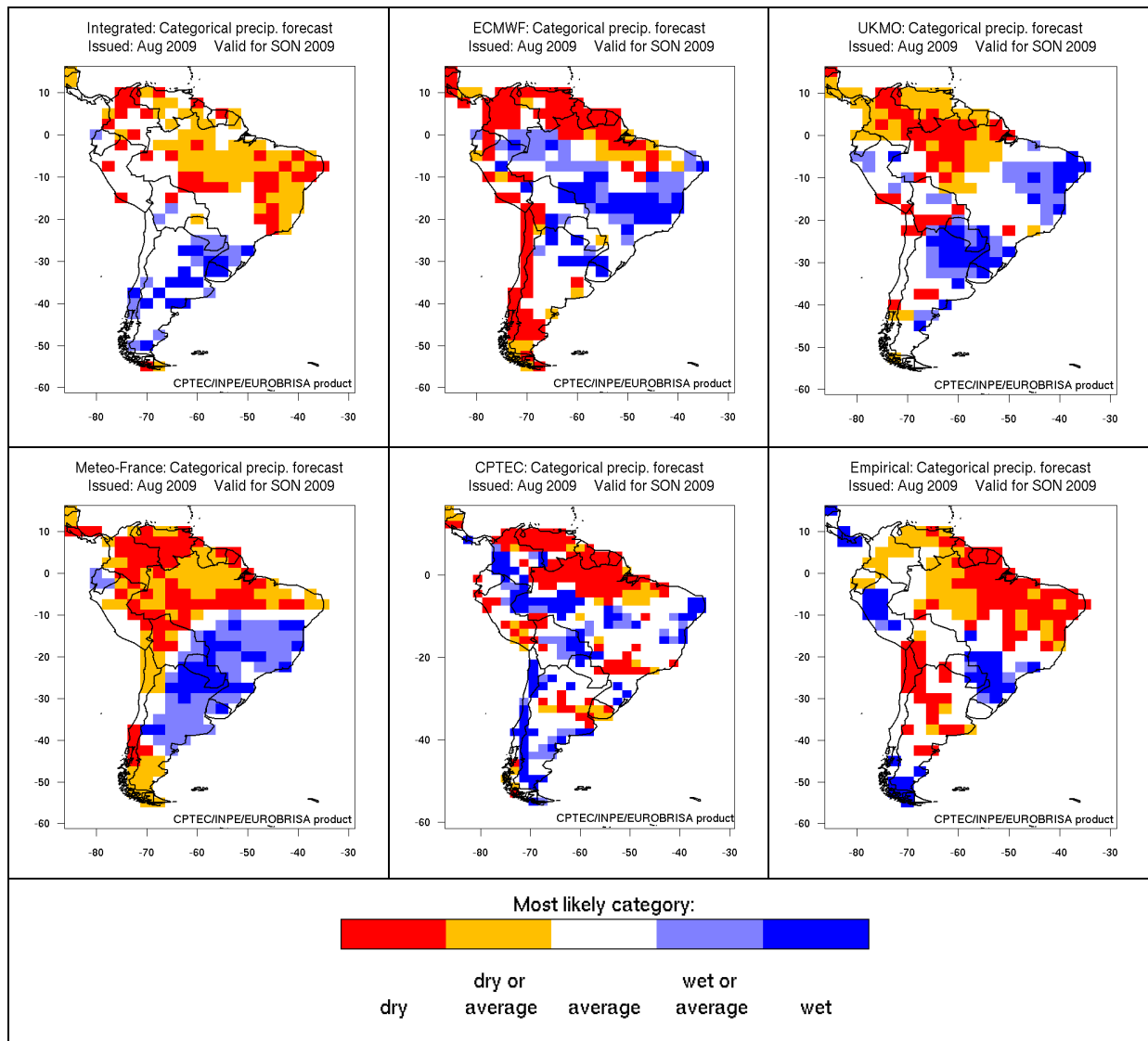


FIGURA 2.3 – PREVISÃO DA CHUVA SAZONAL EM CATEGORIAS VARIANDO ENTRE SECO E ÚMIDO

FONTE: CPTEC (2009)

d) Probabilidade da chuva sazonal prevista estar acima da média: Valores de previsão acima de 60% são coloridos em azul e indicam maior probabilidade de condições mais úmidas que as normais. Valores de previsão menores que 40% são representados nas cores laranja e amarelo e indicam probabilidade reduzida de condições mais úmidas que as normais (ou seja, maior probabilidade de condições mais secas que as normais). Valores de previsão entre 40% e 60% são coloridos em branco e indicam uma previsão balanceada com aproximadamente igual probabilidade para condições acima e abaixo da média.

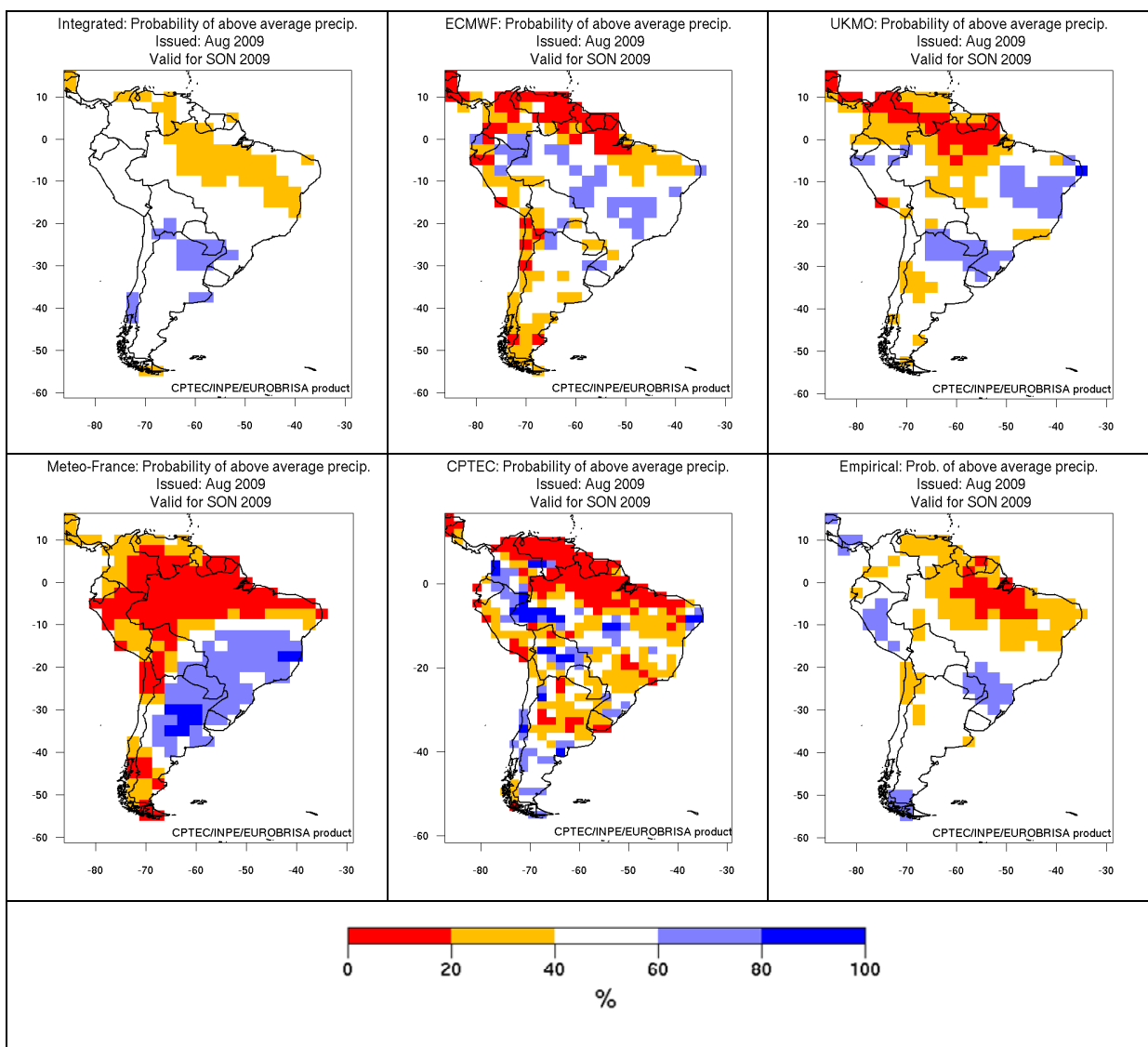


FIGURA 2.4 – PROBABILIDADE DA PREVISÃO DA CHUVA SAZONAL SER ACIMA DA MÉDIA

FONTE: CPTEC (2009)

e) Probabilidade da chuva sazonal prevista estar no tercil inferior: Valores de previsão acima de 40% são coloridos em vermelho, laranja e amarelo, indicando maior probabilidade de condições mais secas que as normais. Valores de previsão menores que 20% aparecem em azul, indicando reduzida probabilidade de condições mais secas que as normais. Valores entre 20% e 40% são representados em branco, indicando proximidade com a probabilidade climatológica de condições mais secas que as normais.

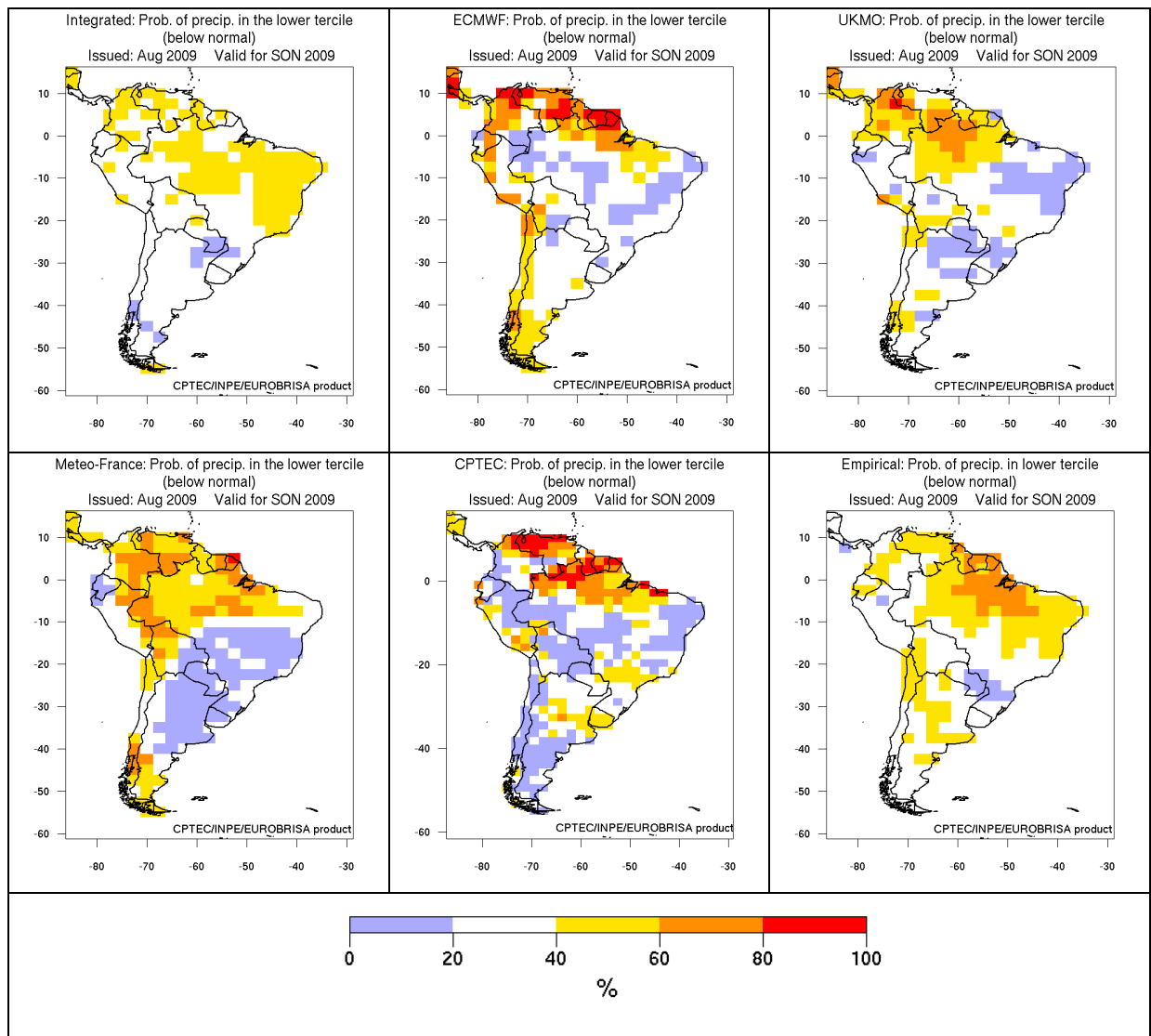


FIGURA 2.5 – PROBABILIDADE DA CHUVA SAZONAL PREVISTA ESTAR NO TERCIL INFERIOR

FONTE: CPTEC (2009)

f) Probabilidade da chuva sazonal prevista estar no tercil superior: Valores de previsão acima de 40% são coloridos em vermelho, laranja e amarelo, indicando maior probabilidade de condições mais úmidas que as normais. Valores de previsão menores que

20% aparecem em azul, indicando menor probabilidade de condições mais úmidas que as normais. Valores entre 20% e 40% são representados em branco, indicando proximidade com a probabilidade climatológica de condições mais úmidas que as normais.

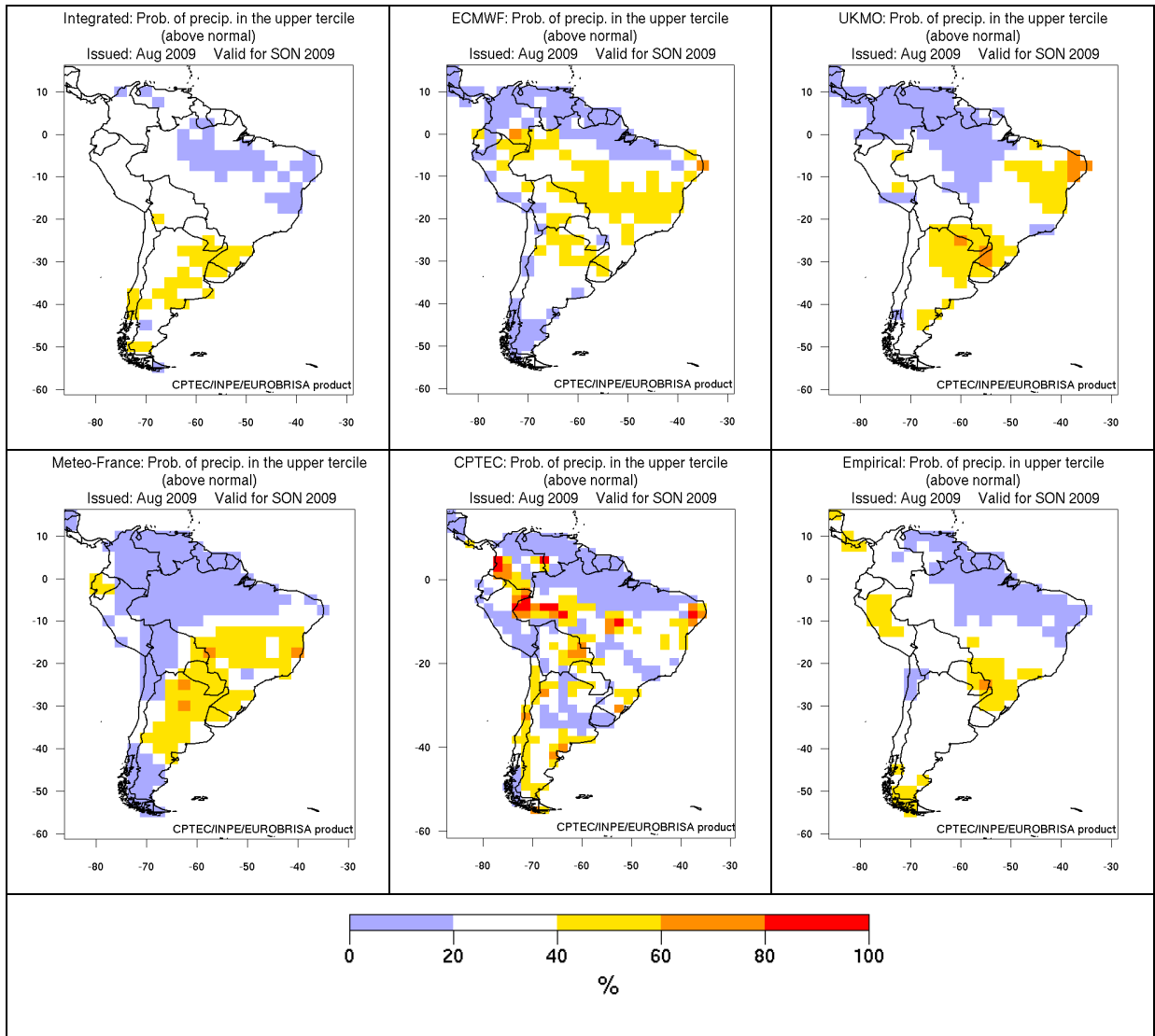


FIGURA 2.6 – PROBABILIDADE DA CHUVA SAZONAL PREVISTA ESTAR NO TERCIL SUPERIOR

FONTE: CPTEC (2009)

g) Probabilidade da chuva sazonal prevista estar no quintil inferior (muito mais seco que as condições normais): Valores de previsão acima de 25% são coloridos em vermelho, laranja e amarelo, indicando maior probabilidade de condições muito mais secas que as normais. Valores de previsão abaixo de 5% são representados em azul, indicando reduzida probabilidade de condições muito mais secas que as normais. Valores entre 5% e 25% aparecem em branco, indicando proximidade com a probabilidade climatológica de

condições muito mais secas que as normais.

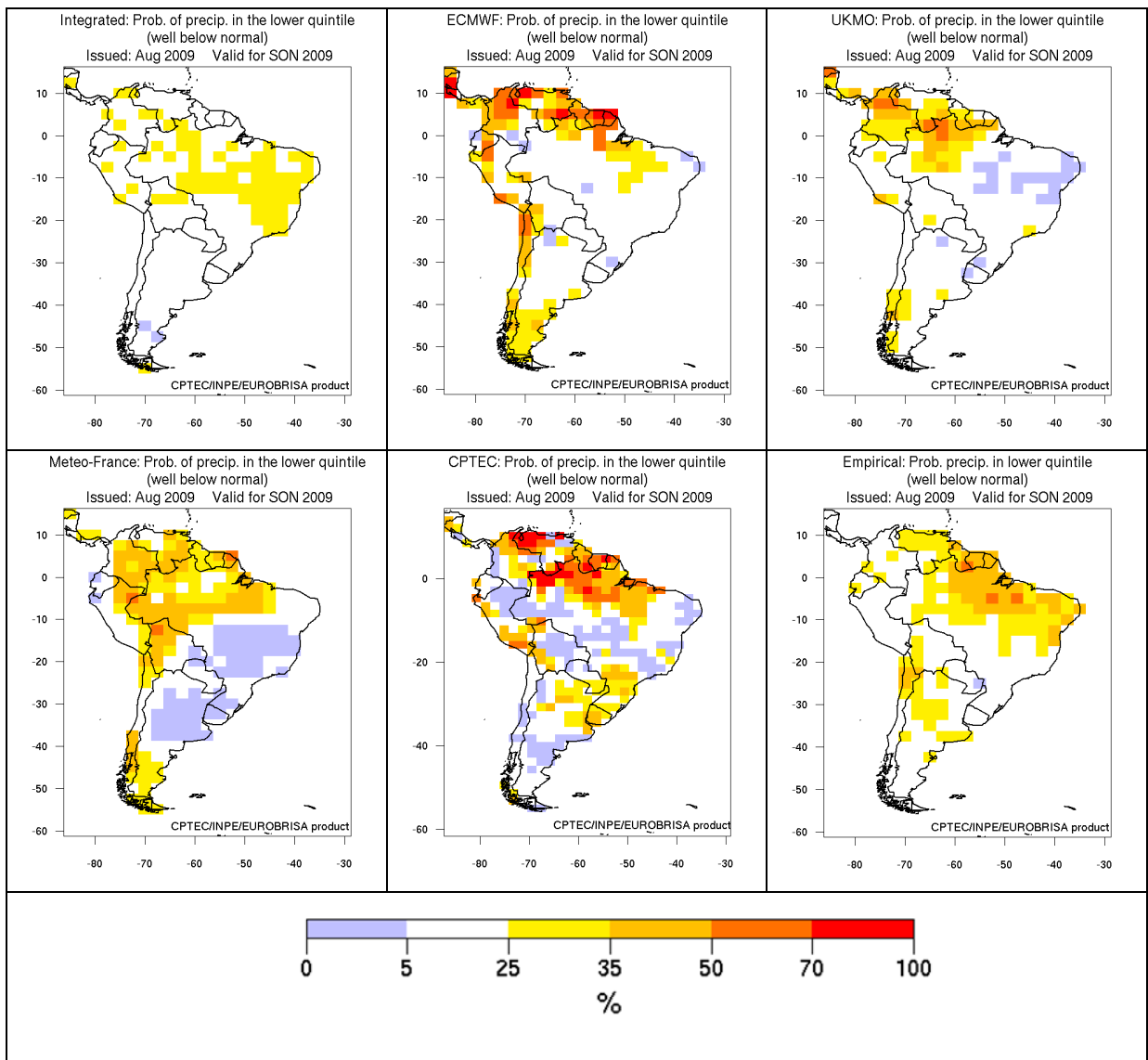


FIGURA 2.7 – PROBABILIDADE DA CHUVA SAZONAL PREVISTA ESTAR NO QUINTIL INFERIOR

FONTE: CPTEC (2009)

h) Probabilidade da chuva sazonal prevista estar no quintil superior (muito mais úmido que as condições normais): Valores de previsão acima de 25% são coloridos em vermelho, laranja e amarelo, indicando maior probabilidade de condições muito mais úmidas que as normais. Valores de previsão abaixo de 5% são representados em azul, indicando reduzida probabilidade de condições muito mais úmidas que as normais. Valores entre 5% e 25% aparecem em branco, indicando proximidade com a probabilidade climatológica de condições muito mais úmidas que as normais.

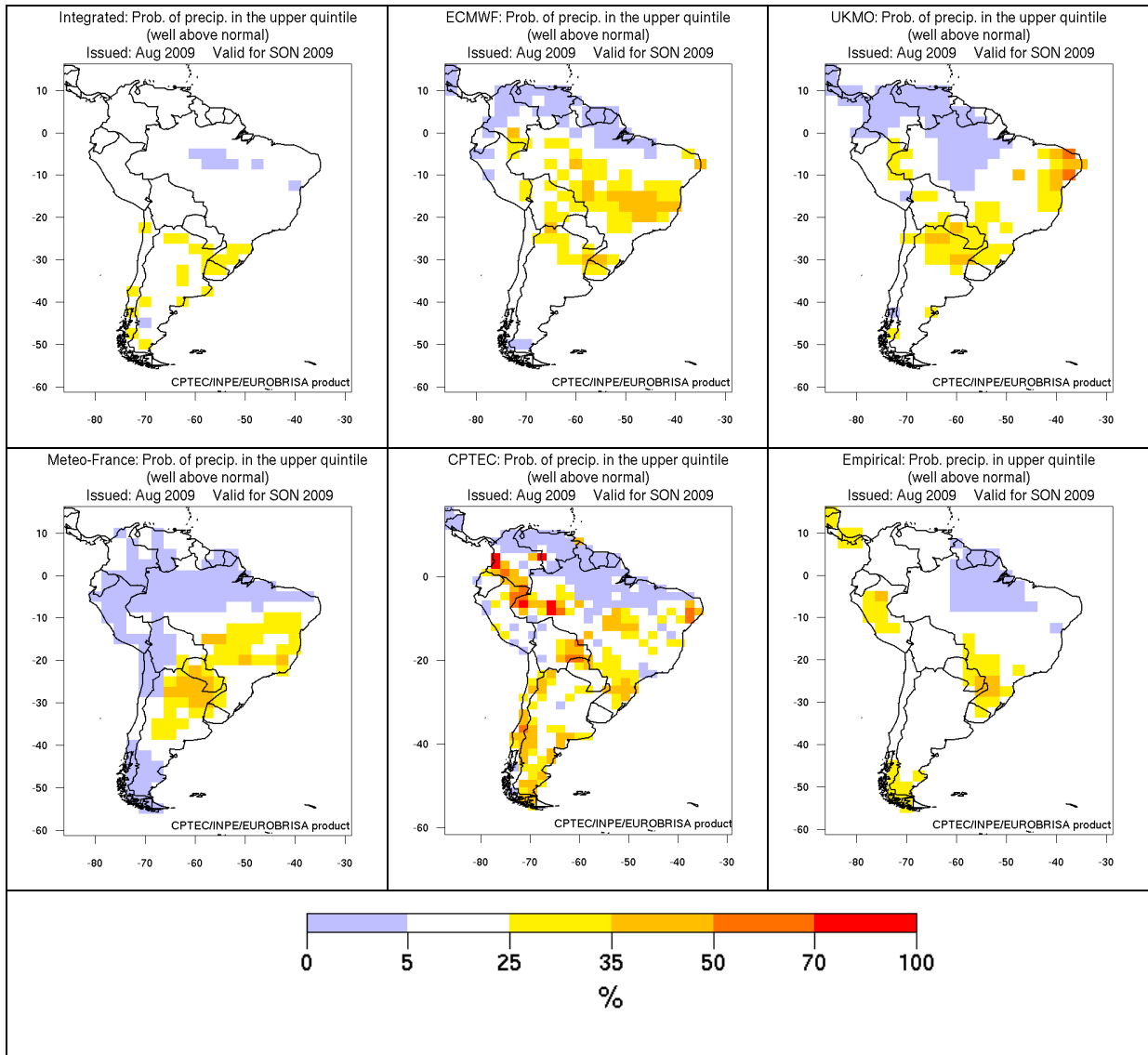


FIGURA 2.8 – PROBABILIDADE DA CHUVA SAZONAL PREVISTA ESTAR NO QUINTIL SUPERIOR

FONTE: CPTEC (2009)

Os produtos de verificação apresentam os índices de acerto das previsões realizadas utilizando o conjunto de dados observados de referência da versão 2 do Projeto Climatológico de Precipitação Global (*Global Precipitation Climatology Project – GPCP*), através da análise feita por Adler *et al.*, (2003). O System 3 da ECMWF, o UK Met Office, a Meteo-France, as previsões empíricas e integradas são verificados utilizando-se previsões retrospectivas (hindcasts) do período de 1987 a 2001.

Os produtos de verificação disponíveis são:

- Mapas de destreza (variam de -1 a 1): Valores positivos são representados em

vermelho, laranja e amarelo e indicam regiões onde as previsões possuem qualidade moderada a boa. Valores negativos são coloridos em azul e indicam regiões onde as previsões possuem pouca qualidade.

- Diagramas de confiabilidade e “*ROC plots*” (curvas de características operacionais relativas): Diagramas executados para os eventos de: anomalia negativa ou positiva de precipitação, precipitação no tercil inferior, precipitação no tercil superior, precipitação no quintil inferior, precipitação no quintil superior.

2.2 PREVISÃO DE VAZÃO SAZONAL

2.2.1 Modelos estocásticos

O texto apresentado a seguir foi desenvolvido a partir de documento do Seminário de Prospecção Tecnológica do ONS (2004) e de ONS (2002).

No âmbito dos estudos de planejamento e programação da operação do SIN, a previsão de vazões tem sido adotada como modelagem apropriada para o horizonte de curto e curtíssimo prazo, a saber, o planejamento da operação mensal (consolidado no Programa Mensal de Operação – PMO), com discretização e revisão semanal, e a programação diária, com discretização horária. No atual estágio de atuação do ONS nestes dois horizontes, cabe ao operador a obtenção de previsões de vazões naturais médias semanais (curto prazo), para utilização na elaboração do PMO e suas revisões, e aos Agentes de Geração a obtenção das previsões de vazões naturais médias diárias (curtíssimo prazo), no contexto do processo de elaboração do Programa Diário de Operação – PDO. No caso deste último, cabe ao ONS a responsabilidade de acompanhar as previsões elaboradas pelos Agentes de Geração, consolidá-las e, em alguns casos, complementá-las.

Para a previsão diária, é utilizado o modelo estocástico PREVIVAZH e também são coletadas previsões junto aos Agentes de Geração, os quais utilizam diferentes metodologias. O resultado das previsões é apresentado em um relatório mensal, e sua execução é realizada através das seguintes funções:

- coleta da previsão de vazões realizada pelos agentes de geração;
- processamento do modelo PREVIVAZH para cálculo das previsões de vazões;
- análise e validação da previsão de vazões diárias.

A previsão semanal de vazões para atendimento ao Programa Mensal de Operação

(PMO) e uso dos modelos SUSI, SIMONE, DECOMP e NEWAVE, é realizada com o processamento do modelo PREVIVAZ que calcula as previsões de vazões naturais médias semanais para um horizonte de até 6 (seis) semanas à frente. O PREVIVAZ é utilizado para todas as bacias do SIN, exceto para a bacia do São Francisco onde se utiliza modelo de propagação (ONS, 2003) assim como se adota modelo estocástico para a geração de cenários de vazões e energias afluentes médias mensais (CEPEL, 2001a) que apresentam, como característica comum a obtenção de projeções apenas com base nas próprias afluições já observadas, considerando o histórico e a tendência hidrológica. O processo de execução do PREVIVAZ é bastante simples, mas a obtenção dos resultados e sua compilação é bastante trabalhosa.

Ainda no âmbito do planejamento da operação eletroenergética mensal, em complementação às previsões de vazões semanais até o final do mês considerado, são utilizados cenários de afluições para o segundo mês do horizonte, obtidos através de geração sintética de vazões médias mensais para cada local de aproveitamento, de modo a dar um tratamento às incertezas das afluições daquele mês. Após estes 2 meses, há o acoplamento entre o modelo de otimização de curto prazo – DECOMP (CEPEL, 2004) no qual as usinas são tratadas de forma individualizada, e o de médio prazo – NEWAVE (CEPEL, 2001b), no qual os aproveitamentos são tratados, simplificadaamente, como um reservatório agregado.

Para o horizonte de médio prazo, ou seja, no planejamento da operação eletroenergética até cinco anos a frente, com especial destaque para o primeiro ano, adota-se a modelagem de geração de cenários de afluições, neste caso de forma agregada, para os quatro subsistemas eletroenergéticos integrantes do SIN (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte), através das energias naturais afluentes aos subsistemas. Estas energias são obtidas através da soma para todas as usinas da multiplicação das vazões naturais afluentes pela produtividade de cada aproveitamento hidrelétrico.

Ao longo dos últimos anos, o ONS tem implementado um programa de aperfeiçoamento dos recursos tecnológicos utilizados em seus processos de planejamento e operação do SIN. No âmbito deste programa, denominado de Plano de Ação, que é sujeito à aprovação e acompanhamento por parte da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), de horizonte tri-anual, com revisão a cada ano, estão inseridos projetos específicos para o aperfeiçoamento e desenvolvimento tecnológico da previsão de tempo e clima, da previsão de carga e da previsão e geração de afluições.

No final do ano de 2004, o ONS iniciou um amplo projeto de desenvolvimento de modelos de previsão de vazões naturais médias diárias, para até 12 dias à frente, com

incorporação de informações de precipitação, observada e prevista. Através de uma análise preliminar da fronteira tecnológica referente aos recursos disponíveis hoje para estes tipos de previsores, chegou-se a um conjunto de alternativas tecnológicas já desenvolvidas e a desenvolver com vasto potencial de aplicação na previsão de vazões até uma semana à frente, conforme a seguir:

- Modelos conceituais (físicos), que contemplam a transformação de chuva em vazão e a propagação de vazões em rios e reservatórios, com a utilização de chuva observada e prevista como insumos;

- Modelos empíricos, baseados em técnicas de hidrologia estocástica, tais como os atualmente adotados nos processos sob a responsabilidade do ONS, de redes neurais, de sistemas especialistas e de inteligência artificial.

No que se refere à geração de cenários de afluências, está sendo desenvolvido estudo para a ampliação do horizonte dos cenários sintéticos de vazões médias mensais, por aproveitamento hidrelétrico, além do 2º mês, para que se possa representar de forma mais adequada, ainda no horizonte dos estudos de curto prazo, a variabilidade hidrológica dentro de cada subsistema eletroenergético. O resultado esperado deste desenvolvimento é o estabelecimento da estrutura de cenários de afluências a ser adotada nos estudos de planejamento de curto prazo, nos aspectos de horizonte e de aberturas adequados para que se tenha o devido acoplamento entre estudos de curto e médio prazo.

2.2.2 Modelos estatísticos usando previsão dinâmica de chuva

Existem modelos que realizam previsões climáticas sazonais com modelos numéricos que simulam os processos físicos da atmosfera usando estados iniciais das superfícies dos oceanos como condições de contorno, ou então através de modelos que acoplam o sistema oceano-atmosfera. Os modelos climáticos dinâmicos produzem conjuntos de previsões, ou “ensembles”, que são grupos de previsões geradas com horizonte de alguns meses à frente, a partir de condições iniciais ligeiramente diferentes (COELHO *et al.*, 2005). Tais modelos poderiam constituir parcialmente uma alternativa aos modelos estocásticos utilizados atualmente pelo ONS.

As previsões climáticas dinâmicas produzidas pelas instituições ECMWF, UKMO e Météo-France possuem resolução espacial da ordem de graus de latitude e longitude, o que equivale a algumas centenas de quilômetros. Essa resolução é incompatível com a necessidade de certos usuários, que requerem maior detalhamento espacial e informações

localizadas. Por esse motivo, Coelho *et al.* (2005) enfatizam a importância e necessidade da conversão de escala espacial (“*down-scaling*” espacial) das previsões para escalas espaciais locais e regionais. Para tanto, sugerem uma metodologia de assimilação Bayesiana (COELHO, 2005; STEPHENSON *et al.*, 2005) aplicada às saídas de diferentes modelos acoplados, para a produção de previsões de chuva para duas regiões da América do Sul e previsões de vazões naturais para o Rio Tocantins, no norte do Brasil. Com essa metodologia, analisam os resultados obtidos para a resolução de três problemas existentes em previsões climáticas:

- “*downscaling*”;
- calibração dos modelos climáticos, para corrigir os desvios sistemáticos entre as previsões climáticas do modelo e as observações;
- combinação, para integrar as previsões produzidas por um conjunto de modelos em uma única previsão que engloba todas as informações disponíveis no momento da previsão.

O método Bayesiano de Coelho (2005) e Stephenson *et al.* (2005) é um procedimento de atualização de informação prévia quando novas informações tornam-se disponíveis utilizado para fazer previsões climáticas. A informação prévia pode ser representada matematicamente pela função densidade de probabilidade $p(y)$. Se houver uma ideia sobre a forma de $p(y)$ de uma variável y para a qual se deseja fazer uma previsão (chuva, por exemplo) e informação adicional (nova) x se tornar disponível (um conjunto de previsões climáticas, por exemplo), então é possível atualizar $p(y)$ para obter a função de densidade de probabilidade condicional posterior $p(y|x)$ através do teorema de Bayes:

$$p(y | x) = \frac{p(y)p(x | y)}{p(x)} \quad (1)$$

O conjunto das saídas dos modelos de previsão climática pode ser utilizado para estimar $p(x)$ (COELHO *et al.*, 2005).

Foi concluído no estudo de Coelho *et al.* (2005) que o método de assimilação Bayesiana foi bem sucedido para a conversão de escalas (“*down-scaling*”) do conjunto de previsões produzidas por diferentes modelos climáticos dinâmicos para as escalas regionais (para previsão de chuva) e locais (para previsão de vazão). Além disso, demonstrou bons resultados para combinar e calibrar o conjunto de previsões climáticas fornecidos pelos três modelos climáticos dinâmicos utilizados (modelos das instituições Météo-France, ECMWF e UKMO).

2.2.3 Modelo hidrológico 3R com atualização de estados

A vazão prevista para uma determinada bacia pode ser obtida com a aplicação de um modelo hidrológico que use como dados de entrada: série de chuva média na bacia (observada), série da vazão observada, climatologia da evapotranspiração potencial e chuva prevista. No presente estudo, a chuva prevista foi obtida através do processamento das previsões fornecidas pelos modelos climáticos dinâmicos descritos anteriormente (seção 2.1).

O modelo hidrológico a ser utilizado neste estudo é o modelo 3R com atualização de estados. Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007a, 2007b) descrevem esse modelo em dois artigos, apresentando estudo realizado com resolução temporal diária. No presente trabalho, a resolução temporal foi mensal aplicada a um horizonte de previsão de três meses. Além disso, as previsões sazonais de chuva fornecidas pelo projeto EUROBRISA foram utilizadas como uma das variáveis de entrada para o modelo. Como essas previsões se referem a trimestres, foi realizada a desagregação das previsões considerando-se que a chuva prevista para determinado mês é igual à chuva prevista para o trimestre em que o mês em questão é o primeiro. Por exemplo, a chuva prevista para o mês de janeiro é igual à chuva prevista para o trimestre janeiro-fevereiro-março.

O modelo 3R é uma adaptação do modelo de Sacramento (BURNASH, FERRAL e MCGUIRE, 1973). No modelo Sacramento, o solo é dividido em duas camadas, a superior e a inferior, sendo que cada uma apresenta subcamadas modeladas por reservatório não lineares. O modelo 3R representa o solo em duas camadas, cada qual representada por um reservatório não-linear, e utiliza uma única cascata de reservatórios não-lineares para representar o processo de laminação do escoamento superficial e a propagação em canal das contribuições de montante. Com essas modificações, a complexidade do modelo é reduzida e é possível acoplar o estimador estocástico-dinâmico, desenvolvido por Guetter e Georgakakos (1997), para realizar a atualização de estados em tempo real. Por outro lado, com as simplificações, perde-se um pouco da capacidade de representar os detalhes dos processos de infiltração e percolação em pequenas bacias. Por esse motivo, o modelo 3R com atualização de estado é indicado para grandes bacias (áreas maiores que 2000 km²) e resolução temporal mínima de algumas horas.

2.3 MÉTRICAS DE ACERTO PARA AS PREVISÕES DE VAZÃO

As estatísticas convencionais empregadas para avaliar os erros (ou resíduos)

referem-se a certas medidas de dispersão, tais como a variância, o desvio padrão e o erro padrão (raiz quadrada do somatório das diferenças entre valores previstos e observados dividido pelo número de valores).

$$\text{erro}_{\text{padrão}} = \sqrt{\frac{\sum (\text{previsto} - \text{observado})^2}{N}} \quad (2)$$

Para casos extremos, como vazões muito altas ou muito baixas, as medidas de dispersão como a variância e o desvio padrão não informam os valores extremos de vazão, pois fornecem um valor médio da diferença entre os valores previstos (ou observados) e a vazão média.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Onde S^2 é a variância, x_i é o valor previsto (ou observado), \bar{x} é a média entre os valores previstos (ou observados), n é o tamanho da amostra, S é o desvio padrão.

Desse modo, são necessárias novas métricas (medidas de erro) para avaliar os extremos ou percentis da distribuição de valores (no contexto desse trabalho, os valores referem-se a vazões previstas e vazões observadas).

Georgakakos *et al.* (2004) apresentam técnicas estatísticas que foram aplicadas em conjuntos de vazão prevista obtidos por um único modelo ou por vários modelos. Entre as sugestões propostas, encontram-se análises de valor médio e análise completa de probabilidade (*full probabilistic analysis*), distribuições de probabilidade conjunta de simulações e observações, curva ROC, métricas escalares de “Brier Score – BS” e “Brier Skill Score – BSS”, distribuições empíricas de frequência acumulativa, modelos paramétricos calibrados concentrados e distribuídos, e estimativa empírica de distribuições. A descrição dessas técnicas é apresentada na seção 3.6, baseando-se no artigo mencionado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Na primeira seção deste capítulo, são apresentados os aproveitamentos hidrelétricos estudados, assim como suas principais características. Na seção seguinte, discute-se sobre: os dados pluviométricos, através de um levantamento das estações pluviométricas que podem ser utilizadas; os dados de vazão natural, com resolução temporal mensal; e os dados de previsão de chuva, onde são determinados quais pontos da malha de dados do projeto EUROBRISA são utilizados para cada usina. A terceira seção apresenta o software “R”, o qual é empregado na extração dos dados de previsão de chuva sazonal. A quarta seção explica de maneira mais aprofundada o modelo chuva-vazão-propagação 3R (KRAUSKOPF NETO, GUETTER e MINE, 2007a, 2007b). A última seção apresenta métodos para análise estatística das previsões de vazão de acordo com Georgakakos *et al.* (2004).

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo em questão compreende três bacias das regiões sudeste e sul do Sistema Interligado Nacional. Para cada bacia, foi selecionado o aproveitamento hidrelétrico de grande porte mais à montante na bacia hidrográfica, uma vez que a afluência ao reservatório depende somente dos fluxos hidrológicos e não requer a reconstituição das vazões naturais nos aproveitamentos à montante. A modelagem chuva-vazão foi realizada com os dados referentes a cada um desses aproveitamentos.

As três bacias das regiões sudeste e sul são:

Região Sudeste (SE)

- Bacia do Grande;
- Bacia do Paranaíba;

Região Sul (S)

- Bacia do Iguaçu;

A tabela 3.1 lista os três aproveitamentos hidrelétricos escolhidos para cada bacia, assim como os códigos do ONS correspondentes, a empresa que opera cada aproveitamento, a área de drenagem, o volume útil dos reservatórios e a potência instalada.

TABELA 3.1 – APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS SELECIONADOS PARA A MODELAGEM CHUVA-VAZÃO

Código ONS	Aproveitamento hidrelétrico	Rio	Empresa	Área de drenagem (km ²)	Volume útil (km ³)	Potência instalada (MW)
006	Furnas	Grande	FURNAS	50.464	17,217	1.312
024	Emborcação	Paranaíba	GEMIG	29.000	13,056	1.192
074	Foz do Areia	Iguaçu	COPEL	29.900	3,804	1.676

FONTE: GUETTER, 2009

A área de drenagem da tabela 3.1 se refere à área total da bacia até o aproveitamento hidrelétrico. Como as usinas selecionadas encontram-se em regiões à montante nas bacias hidrográficas, as áreas de drenagem incrementais desses aproveitamentos são iguais às áreas de drenagem totais apresentadas na tabela 3.1.

A figura 3.1 ilustra a localização dos aproveitamentos selecionados no Sistema Sul/Sudeste para a verificação da vazão prevista.

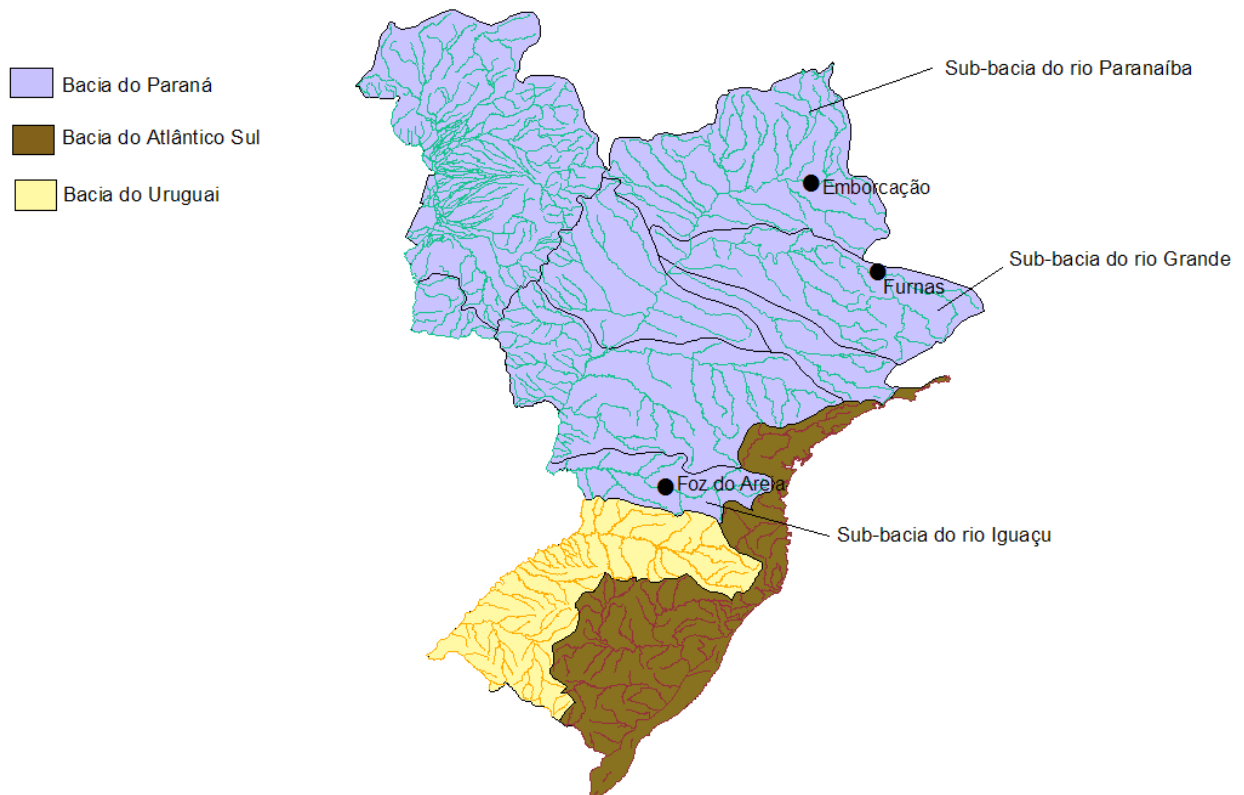


FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS SELECIONADOS

FONTE: A autora (2010)

A tabela 3.2 resume as características (nome do rio, latitude, longitude, área de drenagem) dos aproveitamentos hidrelétricos selecionados.

TABELA 3.2 – APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS, LOCALIZAÇÃO E ÁREAS DE DRENAGEM

Código ONS	Aproveitamento hidrelétrico	Rio	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km ²)
006	Furnas	Grande	-20°40'09"	-46°18'50"	50.464
024	Emborcação	Paranaíba	-18°26'54"	-47°59'05"	29.000
074	Foz do Areia	Iguaçu	-26°00'50"	-51°39'52"	29.900

FONTE: Adaptado de ONS (2005b)

As figuras 3.2 e 3.3 são uma adaptação do diagrama esquemático das usinas hidrelétricas do SIN, com a localização das usinas hidrelétricas (ONS, 2007). Nelas é possível visualizar as usinas à montante e à jusante daquelas selecionadas para esse estudo.

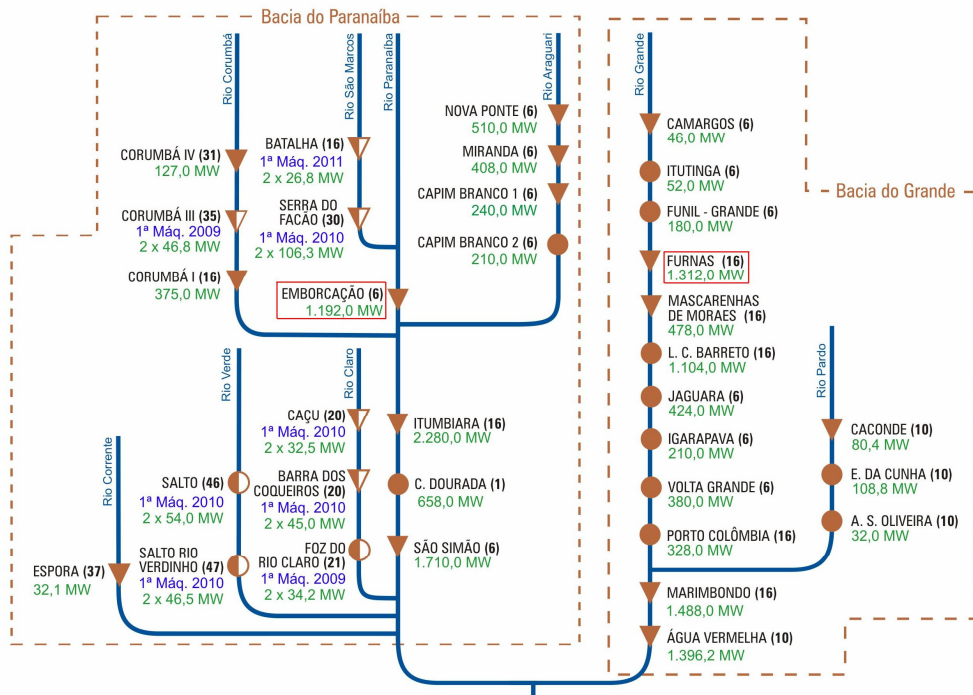


FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DAS USINAS DE FURNAS E EMBORCAÇÃO COM RELAÇÃO ÀS DEMAIS USINAS INTEGRANTES DO SIN NO SISTEMA SUDESTE

FONTE: ONS (2007)

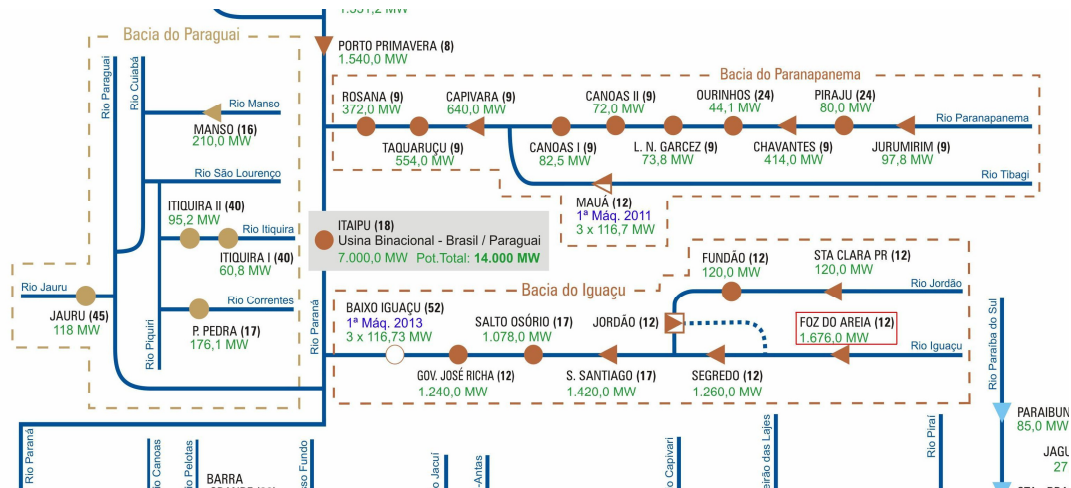


FIGURA 3.3 – LOCALIZAÇÃO DA USINA DE FOZ DO AREIA COM RELAÇÃO ÀS DEMAIS USINAS INTEGRANTES DO SIN NO SISTEMA SUL

FONTE: ONS (2007)

As bacias hidrográficas localizadas nas regiões sudeste e sul possuem características específicas na ocorrência de chuvas. Na região sudeste (bacias dos rios Grande e Paranaíba), há ocorrência de 50% ou mais da chuva anual nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Na estação seca, que corresponde aos meses de junho, julho e agosto, chove menos que 5% do total anual (BRAHAMANANDA RAO, SANTO e FRANCHITO, 2010). Essa característica de grande quantidade de chuvas durante o verão e pouca chuva durante o inverno evidencia o alto grau de sazonalidade existente nessa região. A região sudeste apresenta baixa previsibilidade climática, por se tratar de área de transição do clima quente de latitudes baixas e os climas mesotérmicos, do tipo temperado, das latitudes médias. Nessa região, a previsão sazonal de clima é difícil e o índice de acerto dos modelos de clima ainda é baixo. Em média, as primeiras chuvas significativas, que prenunciam o início do período mais chuvoso na bacia do Rio Paranaíba, ocorrem entre 23 de setembro e 12 outubro, e na bacia do Rio Grande, entre 8 e 27 de setembro (MARENCO *et al.*, 2010).

Na região sul, a sazonalidade não é evidente como na região sudeste. Nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, a porcentagem da chuva anual que ocorre é de 25%, assim como nos meses de junho, julho e agosto (BRAHAMANANDA RAO, SANTO e FRANCHITO, 2010). Desse modo, não há um período mais chuvoso que possa ser caracterizado por sua duração e uma data de início.

3.2 DADOS

3.2.1 Pluviométricos

O propósito da seleção das estações pluviométricas é produzir séries longas e contínuas de precipitação média nas bacias selecionadas.

O critério para a pré-seleção dos postos pluviométricos atendeu a quatro requisitos estabelecidos com o intuito de obter dados de estações bem operadas e com menor número de falhas:

- 1) Pelo menos um posto por bacia selecionada.
- 2) Para bacias com área superior a 50.000 km², a densidade mínima de postos deve ser 1/50.000 km².
- 3) Ano de início da série igual a 1950 ou anterior.
- 4) Índice de falhas inferior a 0,5%.

A tabela 3.3 apresenta o número mínimo de postos pluviométricos utilizados, conforme os requisitos descritos acima.

TABELA 3.3 – APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS ESTUDADOS E QUANTIDADE MÍNIMA DE POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS

Código ONS	Aproveitamento hidrelétrico	Rio	Área de drenagem incremental (km ²)	Número de postos
006	Furnas	Grande	50.464	2
024	Emborcação	Paranaíba	29.000	1
074	Foz do Areia	Iguaçu	29.900	1

FONTE: A autora (2010)

As estações pluviométricas selecionadas, chamadas como estações base, foram filtradas a partir das pré-selecionadas apresentadas no Anexo 1 utilizando-se os seguintes critérios:

- 1) Estações estejam na bacia hidrográfica de cada aproveitamento.
- 2) Localizadas a meia distância entre nascente e exutória da bacia incremental.
- 3) As falhas nos dados devem ser menores do que 5% para o período de 01/1981 a 12/2006.
- 4) Média de 3 a 5 postos pluviométricos por bacia incremental.

Os postos selecionados foram classificados em estações base e estações auxiliares. As estações base obedecem aos critérios descritos acima e, a partir dos dados obtidos por

essas estações, obtém-se uma série longa de dados diários de chuva. As estações auxiliares têm como objetivo fornecer dados para preenchimentos de falhas de dados diários existentes nas estações base. Nesse tipo de estação, não é necessário seguir as recomendações já descritas e procurou-se selecionar as estações próximas às estações base. Para efetuar a correção das falhas das estações base, elas foram substituídas pelos dados correspondentes das estações auxiliares.

Os dados brutos obtidos dos postos pluviométricos foram retirados do Sistema de Informações Hidrológicas da ANA (Agência Nacional de Águas), presente no *website* Hidroweb.

Os dados brutos foram analisados, identificando-se falhas e períodos de dados disponíveis. Os dados foram organizados de modo a poderem servir de entrada para uma rotina desenvolvida em Fortran (“pludia.f”, ANEXO 2). A partir dos arquivos de entrada referentes aos dados das estações base, o programa gera arquivos de saída que apresentam valores de chuva diária média, chuva mensal média, chuva anual média, chuva climatológica média, chuva máxima diária de cada estação para cada ano e períodos de falhas existentes concomitantemente nas estações base selecionadas por aproveitamento. Se houver falhas entre as estações base, são utilizados os dados das estações auxiliares para o período correspondente.

A tabela 3.4 apresenta as estações base e auxiliares cujos dados foram utilizados para, através das rotinas em Fortran, gerar os arquivos de entrada para o modelo 3R:

TABELA 3.4 – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS BASE E AUXILIARES SELECIONADAS PARA OS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS ESTUDADOS

Nome aproveitamento	Tipo estação pluviométrica	Código estação	Nome estação	Período das estações base	Período de falhas nas estações base	Período das estações auxiliares
Furnas – rio Grande	Base	02045004	Santana do Jacaré	1942 – 2004	jun/1989 - dez/1989	1942 – 2009
	Base	02145007	Usina Couro do Cervo			
	Auxiliar	02145017	Monsenhor Paulo			
Emborcação – rio Paranaíba	Base	01847003	Abadia dos Dourados	1942 – 2004		
	Base	01947001	Santa Juliana			
Foz do Areia – rio Iguçu	Base	02550001	São Mateus do Sul	1949 - 2008		
	Base	02550005	Rio Claro do Sul (Eufrozina)			
	Base	02650002	Irineópolis 83865			
	Base	02650003	Marcílio Dias (RVPSC)			

FONTE: A autora (2010)

3.2.2 Vazão natural

O setor elétrico tem adotado 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, e o termo vazão afluente para caracterizar a vazão que chega a um aproveitamento hidrelétrico ou estrutura hidráulica, que é influenciada pelas obras de regularização e demais ações antrópicas porventura existentes na bacia hidrográfica. As vazões naturais são calculadas a partir de séries de vazões observadas em estações fluviométricas e nas vazões afluentes e defluentes nos locais de aproveitamentos, retirando-se o efeito da operação dos reservatórios existentes a montante e incorporando as vazões relativas aos usos consuntivos e à evaporação líquida (ONS, 2005b).

As séries de vazões naturais médias mensais destinam-se aos modelos de planejamento de médio e curto prazo, destacando-se os seus usos para a geração de vazões e energias naturais afluentes aos aproveitamentos e subsistemas eletroenergéticos (ONS, 2008).

3.2.2.1 *Análise das vazões naturais para as regiões sul e sudeste*

Os dados utilizados para análise da vazão natural nos três aproveitamentos hidrelétricos escolhidos referem-se às vazões naturais mensais do período de 1931-2007. A partir da série de vazões naturais fornecidas pelo ONS (SÉRIE DE VAZÕES NATURAIS MÉDIAS MENSAIS, 1931 – 2007), calculou-se o ciclo anual, ou seja a vazão média de longo termo (período 1931 – 2007) para cada mês do ano. A figura 3.4 mostra a média de longo termo das vazões naturais incrementais nos aproveitamentos de Furnas e Água Vermelha na Bacia do Grande.

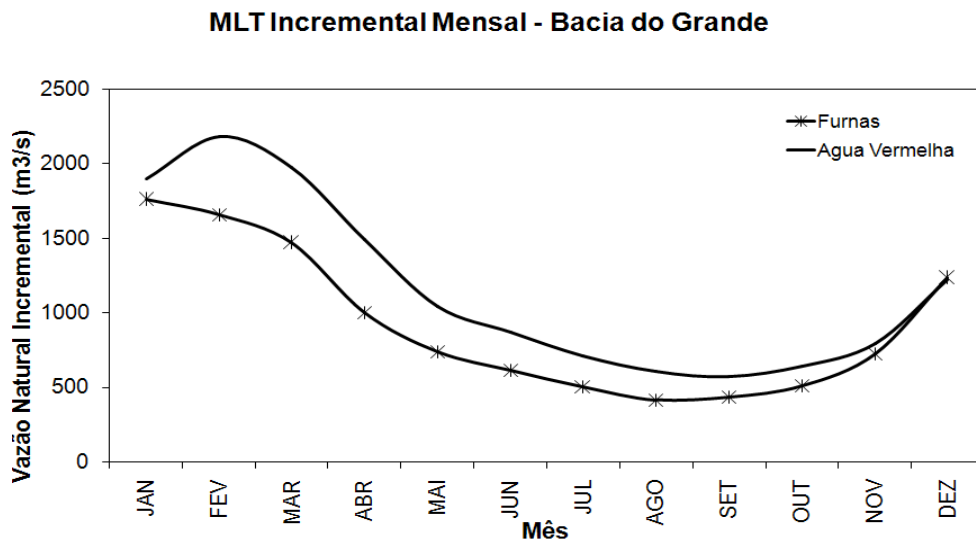


FIGURA 3.4 – MÉDIA DE LONGO TERMO DAS VAZÕES NATURAIS MENSAIS NOS APROVEITAMENTOS DE FURNAS E ÁGUA VERMELHA (BACIA DO GRANDE)

De maneira geral, observa-se que as bacias do sudeste apresentam sazonalidade bem definida, com uma estação seca entre maio e setembro e uma estação úmida entre novembro e março. A relação entre a maior vazão do período úmido e a menor vazão do período seco é da ordem de 3 a 4.

Nas bacias do sul, o ciclo anual das vazões é quase uniforme, não apresentando sazonalidade definida. A figura 3.5 mostra que as médias de longo termo das vazões naturais mensais nos aproveitamentos de Foz do Areia e Salto Caxias (Bacia do Iguazu, região sul) são quase uniformes por não existir uma variação entre vazões mínimas e máximas da mesma ordem de grandeza da região sudeste. Para a região sul, a vazão natural incremental varia de 400 a 1000 m³/s, enquanto que na região sudeste ela varia de 500 a 2500 m³/s. Na região sul, a relação entre a maior e a menor vazão do ciclo anual é da ordem de 2.

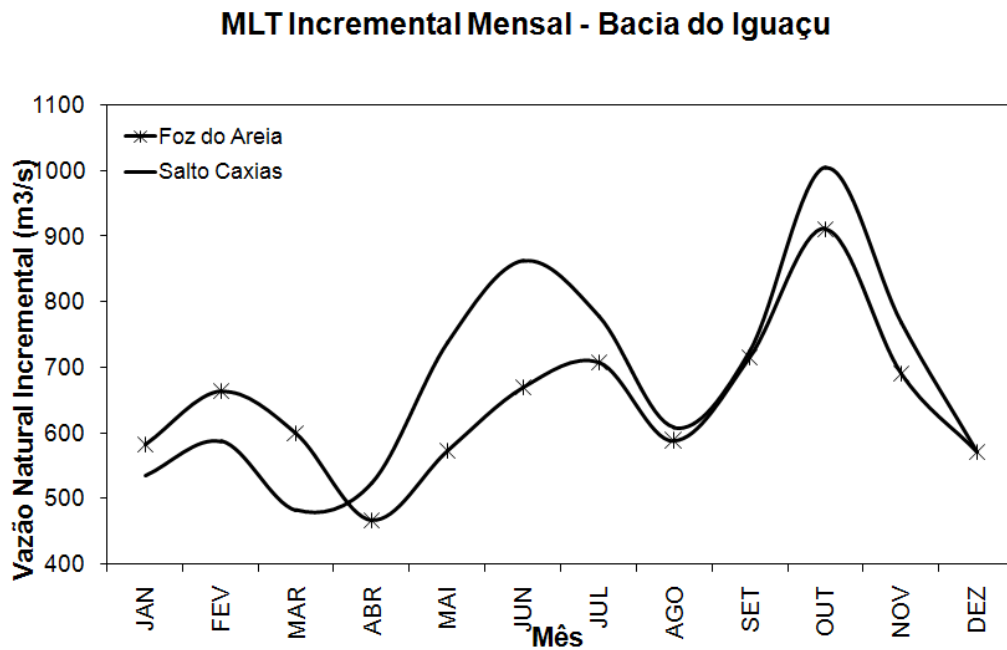


FIGURA 3.5 – MÉDIA DE LONGO TERMO DAS VAZÕES NATURAIS MENSAIS NOS APROVEITAMENTOS DE FOZ DO AREIA E SALTO CAXIAS (BACIA DO IGUAÇU)

A variabilidade espacial do regime de vazões confere robustez e redução de riscos no sistema interligado de geração de energia, pois na época em que há menor produção de energia em uma região devido à estiagem, a outra região pode compensar produzindo mais energia, se estiver em condições hidrológicas mais favoráveis.

A figura 3.6 mostra que as vazões medidas nos aproveitamentos do sudeste no mês de janeiro correspondem à maior parcela das vazões incrementais, como se verifica em especial nos aproveitamentos de São Simão e Água Vermelha (maiores porcentagens). Isso já era esperado, pois foi verificado anteriormente que nessa época observam-se as maiores vazões no sudeste, e que essas são maiores que as máximas observadas em alguns aproveitamentos do sul.

MLT INCREMENTAL - JANEIRO
15.746 m³/s (Itaipu+Iguaçu)

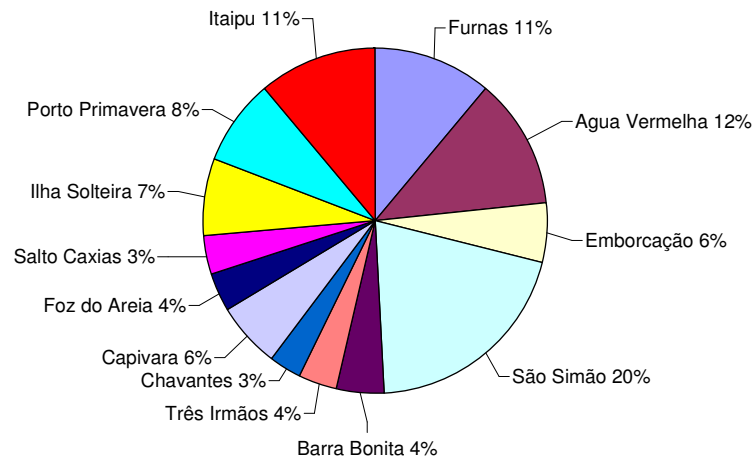


FIGURA 3.6 – PARCELAS DAS VAZÕES INCREMENTAIS PARA ALGUNS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DO SIN DURANTE O MÊS DE JANEIRO

A figura 3.7 mostra as vazões incrementais das regiões sul e sudeste para o mês de outubro, época em que ocorrem cheias no sul. Observa-se que aumenta a contribuição na produção de energia pelas usinas do sul, tais como Salto Caxias e Foz do Areia, e diminui significativamente a contribuição de alguns aproveitamentos do sudeste, como São Simão e Água Vermelha.

MLT INCREMENTAL - OUTUBRO
9.346 m³/s (Itaipu+Iguaçu)

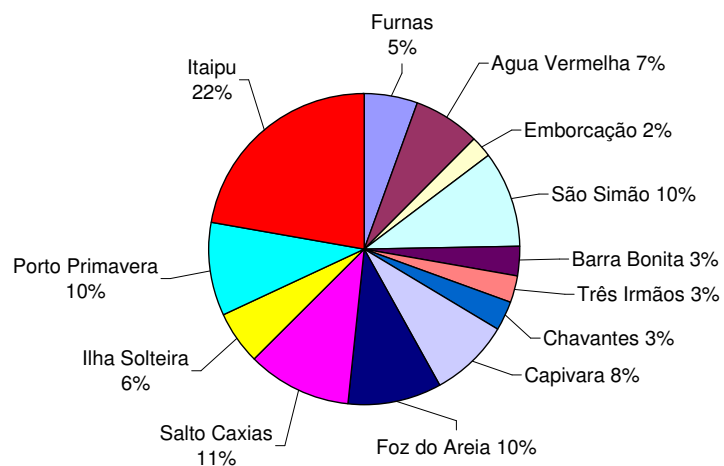


FIGURA 3.7 – PARCELAS DAS VAZÕES INCREMENTAIS PARA ALGUNS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DO SIN DURANTE O MÊS DE OUTUBRO

3.2.2.2 Manipulação dos dados de vazão natural

Os dados brutos de vazão natural média mensal foram obtidos do ONS (SÉRIE DE VAZÕES NATURAIS MÉDIAS MENSAIS, 1931 – 2007).

Foi desenvolvida uma rotina em Fortran (“flumes.f”, ANEXO 3) que transforma os dados de entrada (vazão natural média mensal para cada aproveitamento hidrelétrico estudado) em dados de vazão mensal, vazão anual e vazão climatológica. Nos arquivos de saída também são fornecidos valores de deflúvio, que são resultantes da divisão da vazão pela área de drenagem da bacia incremental.

Para avaliar a ação do reservatório das usinas hidrelétricas na regularização da vazão dos rios, é possível calcular o índice de armazenamento do reservatório e, caso a bacia apresente sazonalidade definida, a capacidade de regularização sazonal.

O índice de armazenamento do reservatório é proveniente da razão entre volume útil e vazão média de longo termo (MLT). Quanto maior for este índice, maior será a capacidade de regularização.

A capacidade de regularização sazonal é calculada obedecendo às seguintes etapas:

- calcula-se a diferença entre a MLT de toda a série histórica e a MLT para cada mês do período seco;
- essas diferenças são somadas e multiplica-se a soma pelo número de segundos da soma dos meses do período seco. O resultado representa o déficit de volume durante o período seco;
- a razão entre o volume útil e o déficit de volume do período seco corresponde à capacidade de regularização sazonal do reservatório.

3.2.3 Evapotranspiração

Os dados de evapotranspiração foram retirados do estudo de Sentelhas *et al.* (1999). Nesse estudo, são fornecidos valores de evapotranspiração potencial calculados através do método Thornthwaite e Mather (1955). Os dados são organizados através de municípios. Desse modo, através da análise de mapas, selecionaram-se os municípios que se situam dentro das bacias incrementais dos aproveitamentos hidrelétricos. Os dados de evapotranspiração potencial mensal correspondentes foram manipulados para servirem como dados de entrada para a rotina em Fortran “petfurnas.f” (ANEXO 4). Como dados de saída, têm-se valores de evapotranspiração potencial média mensal.

3.2.4 Análise de consistência conjunta de chuva, vazão e evapotranspiração

Para realizar a análise de consistência conjunta dos dados de chuva, vazão e evapotranspiração, foi desenvolvida uma rotina em Fortran chamada “balmes.f” (ANEXO 5). Como dados de entrada, são utilizados os arquivos de chuva, vazão e evapotranspiração mensais gerados pelas rotinas correspondentes apresentadas nas seções 3.2.1 a 3.2.3, além de um arquivo que apresenta valores iniciais e coeficientes utilizados ao longo da rotina. Como arquivos de saída, são fornecidos valores de fluxos mensais, razões, dados climatológicos, valores de desvio padrão, anomalias e capacidade de armazenamento de água no solo.

Os cálculos realizados na rotina “balmes.f” obedecem a formulação descrita a seguir, adaptada de Guetter (1997):

Os valores instantâneos de fluxos e armazenamento da equação da continuidade integrada para toda a bacia (área Ω) durante um período Δt são descritos pela equação (5):

$$\int_0^{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left[\iint_{\Omega} w(t, x, y) dx dy \right] dt = \int_0^{\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Omega} [p(t, x, y) - e(t, x, y)] dx dy \right\} dt - \int_0^{\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \oint_{\Omega_c} [q_s(t, \eta) + q_b(t, \eta)] d\eta \right\} dt \quad (5)$$

Onde:

- t - tempo
- x, y - coordenadas do plano horizontal
- Ω_c - perímetro da região
- η - variável de integração ao longo do perímetro
- w - água no solo integrada segundo a vertical
- p - precipitação
- e - evapotranspiração
- q_s - vazão do rio
- q_b - contribuição para o aquífero que não é coletada pela drenagem superficial

Usando letras maiúsculas para expressar os fluxos integrados sobre a área Ω , expressa-se o balanço hídrico médio segundo a área e profundidade:

$$W_i = \int_0^{\Delta t} [P(t) - E(t) - Q_s(t) - Q_b(t)] dt + W_{i-1} \quad (6)$$

Onde, para o intervalo de tempo $\Delta t(t_{i-1}, t_i)$:

- W_i - umidade do solo média segundo a área e profundidade (chamada de água no solo) ao

final do intervalo Δt

A partir desse conceito, constroem-se diversas parametrizações para se aplicar a equação (6) com dados históricos.

A evapotranspiração não é medida diretamente, mas na escala mensal ($\Delta t = 1$ mês) e é expressa por (PENMAN, 1949, *apud* GUETTER, 1997):

$$\int_0^{\Delta t} E(t)dt = \frac{W_i - W_{i-1}}{2W_0} \int_0^{\Delta t} PE(t)dt \quad (7)$$

Onde:

W_0 - capacidade do solo

$PE(t)$ - evapotranspiração potencial, obtida do estudo de Sentelhas *et al.* (1999)

Nota-se que este tipo de função linear para E tem sido usado com sucesso em modelos hidrológicos operacionais como o modelo Sacramento (PECK, 1976).

Na ausência de medições dos fluxos de água subterrânea, $Q_b(t)$ foi parametrizado como uma função linear do escoamento medido na exutória da bacia $Q_S(t)$:

$$\int_0^{\Delta t} Q_b(t)dt = \beta \int_0^{\Delta t} Q_S(t)dt \quad (8)$$

Onde:

β - coeficiente constante

Para o $i^{\text{ésimo}}$ tempo do intervalo $\Delta t(t_{i-1}, t_i)$ define-se Ξ_i por:

$$\Xi_i = \int_0^{\Delta t} \Xi(t)dt \quad (9)$$

Onde:

Ξ - representação para P , E ou Q_S

Então a equação do balanço hídrico para intervalos de tempo discretos tem a forma:

$$W_{i+1} \left[1 + \frac{PE_i}{2W_0} \Delta t \right] = W_i \left[1 + \frac{PE_i}{2W_0} \Delta t \right] + [P_i - Q_{S_i} (1 + \beta)] \Delta t \quad (10)$$

Onde i cobre o período histórico de observações.

A solução da equação (10) requer uma condição inicial e estimativas dos parâmetros W_0 e β . Para um par de valores W_0 e β se escolheu uma condição inicial ($W_i = 0$) e a equação (10) foi usada para processar todos os dados resultando em estimativas de W_i para todos os meses i . Estabeleceu-se a condição $W_i > 0$ para se estimar a condição inferior, W_0^* , e obter W_0 . Em um estudo de sensibilidade, vários valores maiores que W_0^* foram usados sem

que houvesse mudança significativa dos resultados. Assumiu-se que a condição $W_i = 0$ seja o valor obtido com aplicação da equação (10) às climatologias mensais. Há convergência das iterações quando as estimativas de água no solo para cada um dos doze meses não se altera entre iterações consecutivas.

3.2.5 Previsão de chuvas sazonais

Os aproveitamentos hidrelétricos selecionados foram localizados em um mapa das bacias hidrográficas do Brasil. Para cada usina, foi determinado um retângulo que representa a bacia incremental que influencia as vazões afluentes aos reservatórios. Essa representação foi feita para ser possível identificar quais pontos da malha de dados de previsão de chuva encontram-se dentro e ao redor da bacia incremental. A tabela 3.5 apresenta os limites das bacias incrementais.

TABELA 3.5 – LIMITES DAS BACIAS INCREMENTAIS DOS APROVEITAMENTOS SELECIONADOS

Aproveitamento	Limites	Limites da bacia	
		Latitude	Longitude
Furnas – rio Grande	NW	-20,64°	-46,33°
	NE	-20,64°	-43,68°
	SW	-22,95°	-46,33°
	SE	-22,95°	-43,68°
Emborcação – rio Paranaíba	NW	-15,42°	-48,02°
	NE	-15,42°	-46,03°
	SW	-20,36°	-48,02°
	SE	-20,36°	-46,03°
Foz do Areia – rio Iguaçu	NW	-25,50°	-51,65°
	NE	-25,50°	-48,94°
	SW	-26,91°	-51,65°
	SE	-26,91°	-48,94°

FONTE: A autora (2010)

Os dados de previsão integrada de chuva são provenientes da versão inicialmente implementada do projeto EUROBRISA em 2007, onde a previsão integrada é resultado da calibração e combinação dos modelos do ECMWF, UK Met Office e um modelo empírico (estatístico) que usa Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos oceanos Pacífico e Atlântico como preditores para precipitação sobre a América do Sul para o período 1987 - 2001. Para cada ponto em uma grade que varia de 2,5° tanto na longitude como na latitude, é possível obter-se dados de:

- anomalia média prevista (“hindcast integrado”): em mm/dia, período 1987 – 2001
- desvio padrão (“hindcast integrado”): em mm/dia, período 1987 – 2001

- anomalias observadas: em mm/dia, período 1979 – 2006
- precipitação global mensal observada: em mm/dia, período de 1979 – 2006

Para extraírem-se os dados de previsão de interesse, primeiramente foi necessário selecionar os pontos da grade que se encontram dentro e/ou ao redor da bacia incremental referente a cada aproveitamento hidrelétrico. Esses pontos são representados através de siglas que os localizam espacialmente. A figura 3.8 esquematiza os pontos, juntamente com suas siglas:

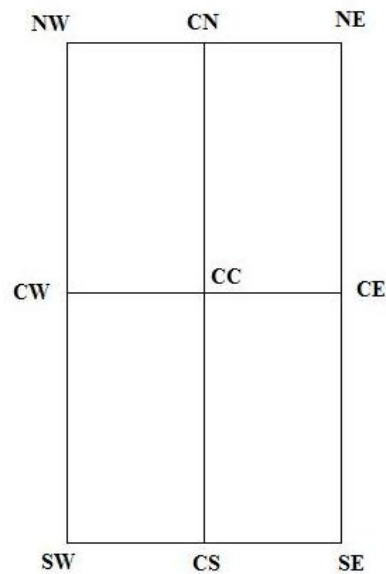


FIGURA 3.8 – ESQUEMATIZAÇÃO DOS POSSÍVEIS PONTOS DE GRADE SELECIONADOS PARA CADA APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO

FONTE: A autora (2010)

Não foi necessário utilizar todos os pontos mostrados na figura 3.8 para representar as áreas das bacias incrementais dos aproveitamentos estudados, devido ao tamanho e desenho dessas bacias.

A tabela 3.6 apresenta os pontos de grade selecionados para cada aproveitamento hidrelétrico, juntamente com as siglas, latitudes e longitudes correspondentes.

TABELA 3.6 – PONTOS DA GRADE DE PREVISÃO DE CHUVA SELECIONADOS PARA CADA APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO ESTUDADO

Aproveitamento	Ponto	LAT	LON
Furnas – rio Grande	NW	-20°	-47,5°
	CN	-20°	-45°
	NE	-20°	-42,5°
	CW		
	CC		
	CE		
	SW	-22,5°	-47,5°
	CS	-22,5°	-45°
Emborcação – rio Paranaíba	SE	-22,5°	-42,5°
	NW	-15°	-47,5°
	CN		
	NE	-15°	-45°
	CW	-17,5°	-47,5°
	CC		
	CE	-17,5°	-45°
	SW	-20°	-47,5°
Foz do Areia – rio Iguaçu	CS		
	SE	-20°	-45°
	NW	-25°	-52,5°
	CN	-25°	-50°
	NE	-25°	-47,5°
	CW		
	CC		
	CE		
SW	-27,5°	-52,5°	
CS	-27,5°	-50°	
SE	-27,5°	-47,5°	

FONTE: A autora (2010)

A figura 3.9 apresenta as usinas hidrelétricas (pontos pretos), as bacias hidrográficas incrementais (retângulos em verde), as estações pluviométricas selecionadas por bacia (pontos vermelhos), a malha das previsões de chuva, com resolução de 2,5°, e os pontos dessa malha utilizados no estudo desenvolvido (triângulos azuis).

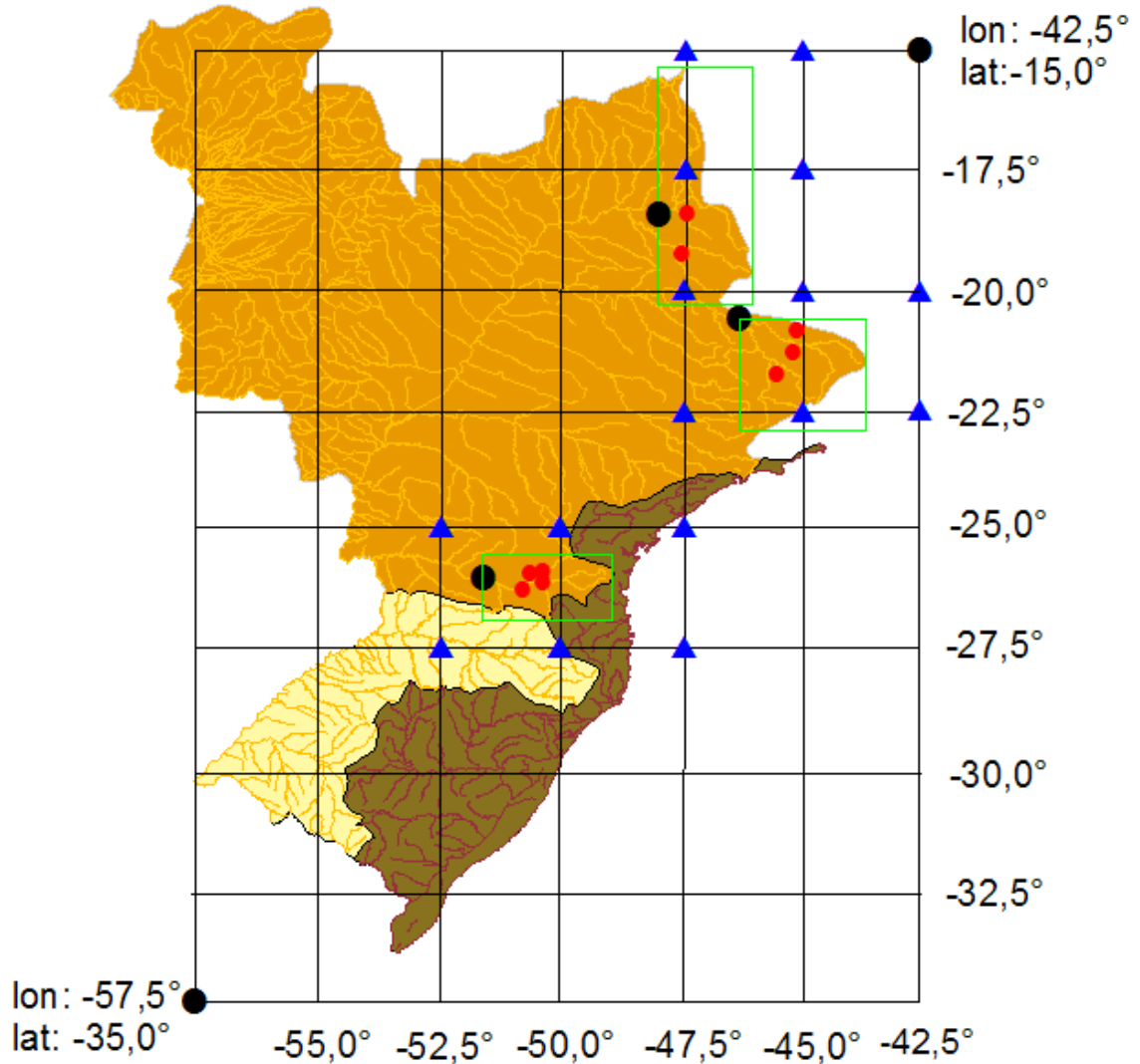


FIGURA 3.9 – APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS, BACIAS INCREMENTAIS, ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E PONTOS DE PREVISÃO DE CHUVA

FONTE: A autora (2010)

3.2.6 Sistema de geração

A tabela 3.7 apresenta os aproveitamentos hidrelétricos existentes atualmente nas bacias dos rios: Paranaíba, Grande e Iguaçu. A tabela 3.8 informa os principais atributos hidráulicos, hidrológicos e energéticos dessas usinas (ONS, 2005b).

TABELA 3.7 – IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS

Aproveitamento	Rio	Operadora	Início	Latitude	Longitude
Bacia do rio Paranaíba					
Emborcação	Paranaíba	CEMIG	02/02/1982	-18°26'54"	-47°59'05"
Nova Ponte	Araguari	CEMIG	07/12/1994	-19°08'02"	-47°41'39"
Miranda	Araguari	CEMIG	30/05/1998	-18°54'48"	-48°02'21"
Corumbá I	Corumbá	FURNAS	30/04/1997	-17°59'22"	-48°31'57"
Itumbiara	Paranaíba	FURNAS	28/04/1980	-18°24'30"	-49°05'57"
Cachoeira Dourada	Paranaíba	COSA	24/01/1959	-18°30'07"	-49°29'28"
São Simão	Paranaíba	CEMIG	01/02/1978	-19°00'55"	-50°29'35"
Bacia do Rio Grande					
Camargos	Grande	CEMIG	12/08/1960	-21°19'23"	-44°36'35"
Itutinga	Grande	CEMIG	11/04/1955	-21°17'31"	-44°37'09"
Funil	Grande	CEMIG	Dez/2002	-21°08'38"	-45°02'13"
Furnas	Grande	FURNAS	04/09/1963	-20°40'09"	-46°18'50"
Mascarenhas de Moraes (Peixoto)	Grande	FURNAS	Mai/2005	-20°16'55"	-47°04'01"
Luiz C. Barreto de Carvalho (Estreito)	Grande	FURNAS	16/03/1969	-20°09'03"	-47°16'49"
Jaguara	Grande	CEMIG	24/04/1971	-20°01'13"	-47°25'34"
Igarapava	Grande	CEMIG	23/12/1998	-19°59'14"	-47°45'26"
Volta Grande	Grande	CEMIG	22/07/1974	-20°01'58"	-48°13'17"
Porto Colômbia	Grande	FURNAS	03/07/1973	-20°07'52"	-48°34'20"
Caconde	Pardo	AES	22/08/1966	-21°34'27"	-46°37'19"
Euclides da Cunha	Pardo	AES	1960 e 04/01/1979	-21°26'17"	-46°57'08"
Armando Salles de Oliveira (Limoeiro)	Pardo	AES	1958 e 03/03/1979	-21°37'31"	-47°00'56"
Marimbondo	Grande	FURNAS	25/10/1975	-20°18'47"	-49°11'18"
José Ermírio de Moraes (Água Vermelha)	Grande	AES	22/08/1978	-19°51'52"	-50°20'55"
Bacia do rio Iguaçu					
Foz do Areia (Gov. B. Munhoz R. Netto)	Iguaçu	COPEL	22/09/1980	-26°00'50"	-51°39'52"
Segredo	Iguaçu	COPEL	26/09/1992	-25°47'17"	-52°06'51"
Desvio Jordão	Jordão	COPEL	09/05/1996	-25°45'35"	-52°05'08"
Salto Santiago	Iguaçu	TRACTEBEL	03/01/1981	-25°37'16"	-52°36'32"
Salto Osório	Iguaçu	TRACTEBEL	14/10/1975	-25°32'14"	-53°00'32"
Salto Caxias	Iguaçu	COPEL	01/03/1999	-25°32'34"	-53°29'25"

FONTE: ONS (2005b).

TABELA 3.8 – ATRIBUTOS HIDRÁULICOS, HIDROLÓGICOS E ENERGÉTICOS DOS APROVEITAMENTOS

Aproveitamento	Potência instalada (MW)	Área de drenagem (km ²)	Diferença entre os níveis máximo e mínimo normais (m)	Vazão média de longo termo (m ³ /s)	Volume útil (hm ³)
Bacia do rio Paranaíba					
Emborcação	1192	29050	46,00	489	13056,00
Nova Ponte	510	15480	39,50	300	10380,00
Miranda	408	18124	3,00	349	146,00
Corumbá I	375	27604	25,00	459	1030,00
Itumbiara	2280	94728	25,00	1564	12454,00

Aproveitamento	Potência instalada (MW)	Área de drenagem (km ²)	Diferença entre os níveis máximo e mínimo normais (m)	Vazão média de longo termo (m ³ /s)	Volume útil (hm ³)
Cachoeira Dourada	658	99775	6,12	1641	218,17
São Simão	1710	171474	10,5	2404	5540,00
Bacia do Rio Grande					
Camargos	46	6279	13,97	132	672,00
Itutinga	52	6302	6,00	132	7,04
Funil	180	15770	0,20	227	7,00
Furnas	1312	52138	18,00	924	17217,00
Mascarenhas de Moraes (Peixoto)	478	59730	13,00	1033	2500,00
Luiz C. Barreto de Carvalho (Estreito)	1104	61252	4,00	1058	178,00
Jaguara	424	61871	3,00	1068	90,00
Igarapava	210	63693	1,00	1098	35,00
Volta Grande	380	67691	1,40	1164	268,00
Porto Colômbia	328	77427	1,70	1323	234,00
Caconde	80,4	2588	30,00	54	504,00
Euclides da Cunha	108,8	4392	5,50	88	4,70
Armando Salles de Oliveira (Limoeiro)	32	4471	10,00	89	16,40
Marimondo	1488	118515	20,30	1850	5260,00
José Ermírio de Moraes (Água Vermelha)	1396	139437	10,00	2093	5169,00
Bacia do rio Iguaçu					
Foz do Areia (Gov. B. Munhoz R. Neto)	1676	30127	42,00	645	3804,70
Segredo	1260	34346	5,00	744	388,00
Desvio Jordão	6,5	4682	8,00	126	25,10
Salto Santiago	1420	43852	25,00	988	4112,90
Salto Osório	1078	45769	8,00	1035	402,70
Salto Caxias	1240	56977	2,00	1328	272,80

* - com tributários

FONTE: ONS (2005b)

3.3 SOFTWARE “R” DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

O software “R” é uma linguagem e ambiente voltado para análises estatísticas e gráficos. É um projeto que foi desenvolvido nos laboratórios Bell por John Chambers e colaboradores. Esse programa fornece uma ampla variedade de técnicas estatísticas e gráficas, e é um software gratuito, disponível sob os termos da *Free Software Foundation's GNU General Public License* em formato de código fonte. Ele compila e roda em diferentes sistemas operacionais, incluindo o Windows. Grande parte do sistema foi desenvolvida em uma linguagem própria, e para tarefas computacionalmente mais intensas é possível juntar

rotinas em linguagem C, C++ e Fortran (SOFTWARE R, 2009).

O ambiente “R” é um conjunto integrado de recursos de software para manipulação, cálculos e disposição gráfica de dados. Entre outras coisas, ele possui:

- manipulação efetiva de dados e recurso de armazenamento;
- conjunto de operadores para cálculos com vetores, em particular matrizes;
- coleção ampla, coerente e integrada de ferramentas intermediárias para análise de dados;
- recursos gráficos para análise de dados e disposição direta no computador;
- linguagem de programação bem desenvolvida, simples e efetiva que inclui condicionantes, iterações (“loops”), funções recursivas definidas pelo usuário e recursos de entrada e saída.

“R” é um veículo para métodos desenvolvidos recentemente de análise de dados interativa e trata-se de um ambiente dinâmico (VENABLES, SMITH e R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2004).

Esse software foi utilizado na extração dos dados de previsão de chuva gerados pelo projeto EUROBRISA.

3.4 MODELO HIDROLÓGICO 3R COM ATUALIZAÇÃO DE ESTADOS

3.4.1 Modelo chuva-vazão-propagação 3R

No artigo de Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007a), é apresentada a seguinte explicação sobre o modelo chuva-vazão-propagação 3R.

O modelo 3R, cujo nome tem origem nas iniciais das palavras “rainfall-runoff-routing” (chuva-vazão-propagação), é uma adaptação, para a aplicação em grandes bacias, do modelo Sacramento (GUETTER, GEORGAKAKOS e TSONIS, 1996).

O modelo Sacramento foi descrito por Burnash, Ferral e McGuire (1973), Peck (1976) e Guetter, Georgakakos e Smith (1990). A formulação do processo de transformação da chuva em vazão no modelo Sacramento consiste na representação do solo em duas camadas, a superior e a inferior, cada qual composta por subcamadas, modeladas por reservatórios não-lineares, para representação dos armazenamentos da água livre (gravitacional) e da água sujeita à tensão de capilaridade. No total, há cinco subcamadas de solo. O modelo Sacramento não depende de escala, podendo simular tanto pequenas quanto

grandes bacias. Todavia, a complexidade de sua formulação (cinco estados - armazenamentos dos reservatórios que representam as subcamadas de solo - e dezessete parâmetros de bacia) dificulta o desenvolvimento de um estimador de estado para uso com o modelo. Guetter adaptou a formulação do modelo Sacramento, representando cada camada de solo por um único reservatório não-linear e utilizando uma única cascata de reservatórios não-lineares para representar tanto o processo de laminação do escoamento superficial quanto a propagação em canal das contribuições de montante, denominando o modelo resultante de 3R (GUETTER, GEORGAKAKOS e TSONIS, 1996). Estas alterações reduziram a complexidade do modelo (dois estados e nove parâmetros de bacia), mas também diminuíram a capacidade de representar os detalhes dos processos de infiltração e percolação em pequenas bacias. Assim, o modelo 3R é indicado para uso em grandes bacias e para a resolução temporal de algumas horas, ou preferencialmente, para a resolução diária.

A estrutura do modelo 3R está ilustrada na figura 3.10.

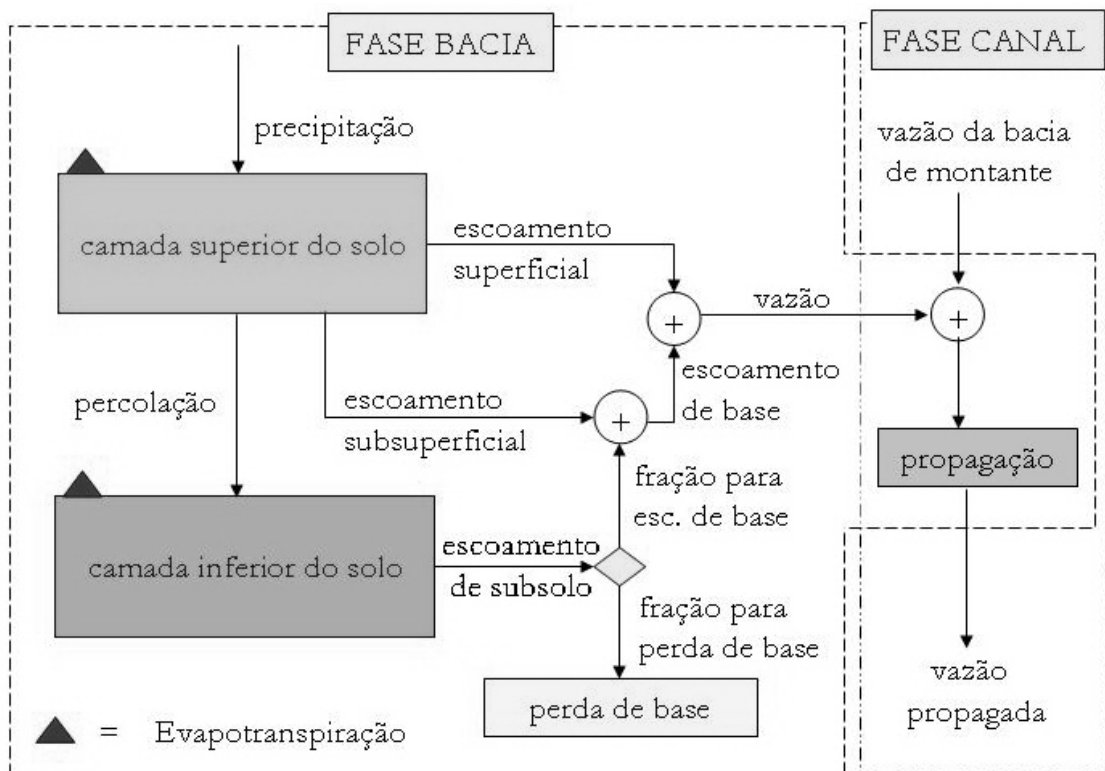


FIGURA 3.10 – ESTRUTURA DO MODELO 3R

FONTE: KRAUSKOPF NETO *et al.* (2007a)

O modelo 3R é um modelo hidrológico determinístico, conceitual e com aplicação distribuída. Na versão distribuída para grandes bacias, o modelo 3R representa dois conjuntos

de processos: (1) fase bacia, que é o balanço hídrico, na sub-bacia, da água nas duas camadas do solo, usando a chuva e a evapotranspiração potencial como dados de entrada e gerando os escoamentos superficial, subsuperficial e de base; (2) fase canal, que responde pela laminação dos escoamentos produzidos pelo balanço hídrico nas sub-bacias e pela propagação das contribuições das bacias de montante.

3.4.1.1 Armazenamentos do modelo 3R

Cada sub-bacia representada pelo modelo 3R apresenta $n + 2$ reservatórios, cujos armazenamentos são as variáveis de estado, sendo dois para a representação do armazenamento no solo na fase bacia e n , em cascata, para representação da propagação de vazões em canal. As variáveis de estado do modelo 3R são: X_1 = armazenamento na camada superior de solo, em mm; X_2 = armazenamento na camada inferior de solo, em mm; S_i = armazenamento do tramo i do trecho de canal, em mm, com i variando de 1 a n .

3.4.1.2 Fluxos do modelo 3R

Os fluxos da fase bacia do modelo 3R são definidos por unidade de área da bacia, sendo expressos como alturas de lâmina de água por unidade de tempo, por exemplo, em mm/dia. A camada superior do solo simula os processos hidrológicos rápidos, que dependem diretamente da ocorrência da chuva e da intensidade da evaporação potencial. O fluxo de entrada da camada superior do solo é a precipitação média sobre a área da bacia, que deve ser fornecida como dado de entrada para o modelo. A camada superior do solo produz quatro fluxos de saída: (1) escoamento superficial, que é proveniente ou da chuva que excede a capacidade de infiltração do solo não saturado, ou do excesso de precipitação em um trecho já saturado da bacia; (2) evapotranspiração da camada superior, que simula as perdas de umidade pela evaporação e a parcela de transpiração da camada superior; (3) escoamento subsuperficial, que é o escoamento na zona vadosa ou aerada do solo, decorrente do gradiente lateral do grau de saturação do solo; (4) percolação, que é o fluxo vertical que transfere água da camada superior do solo para a inferior.

Os 3 primeiros fluxos dependem apenas do armazenamento da camada superior do solo, enquanto que o último é dependente do armazenamento na camada superior e do déficit de umidade da camada inferior.

A camada inferior do solo simula os processos hidrológicos mais lentos da bacia. O fluxo de entrada na camada inferior é a percolação e são produzidos três fluxos de saída: (1) fração do escoamento subterrâneo que contribui para o escoamento de base; (2) recarga do aquífero, que é fração do escoamento subterrâneo que provoca a subida do nível freático e que não aparece no exutório da bacia; (3) transpiração, que é a fração dominante das perdas de evapotranspiração na camada inferior do solo.

A somatória dos escoamentos superficial, subsuperficial e de base forma uma contribuição em marcha para o canal natural de drenagem, devendo ser propagada até o exutório da bacia pelo algoritmo que simula a fase canal do 3R. Caso a bacia simulada tenha outras bacias a montante, então a vazão propagada é composta pela soma dos escoamentos produzidos pela transformação chuva-vazão da fase bacia e pelas vazões afluentes das bacias de montante.

3.4.1.3 Equações governantes do modelo 3R

Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007a) apresentam as equações e parâmetros que estão descritos nessa seção. O modelo chuva-vazão-propagação 3R é apresentado como um conjunto de equações diferenciais ordinárias que representam as variações temporais do armazenamento dos dois reservatórios de solo e dos reservatórios do algoritmo de propagação de vazões. Como as equações governantes representam as taxas de variação no tempo de cada variável de estado, se diz que o modelo é representado no espaço de estados. As variáveis de estado variam diretamente com o tempo. Os fluxos são funções dos armazenamentos, variando implicitamente com o tempo. As $n + 2$ equações de estado do modelo 3R são:

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = PREC - SR - INT - ET_1 - PR \quad (11)$$

$$\frac{dX_2(t)}{dt} = PR - ET_2 - GW \quad (12)$$

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = (SR + BSF) \frac{A_{inc}}{A_{tot}} + Q_{AFL} \frac{86,4}{A_{tot}} - \beta(S_1)^m \quad (13)$$

$$\frac{dS_i(t)}{dt} = \beta(S_{i-1})^m - \beta(S_i)^m, \text{ para } i = 2, n \quad (14)$$

Os termos das equações (11) a (14) são:

t - tempo

- X_1 - armazenamento na camada superior do solo (mm)
 $PREC$ - precipitação (mm/dia)
 SR - escoamento superficial (mm/dia)
 PR - percolação (mm/dia)
 ET_1 - evapotranspiração na camada superior do solo (mm/dia)
 INT - escoamento subsuperficial (mm/dia)
 X_2 - armazenamento na camada inferior do solo (mm)
 ET_2 - transpiração na camada inferior do solo (mm/dia)
 GW - escoamento subterrâneo (mm/dia)
 BSF - escoamento de base (mm/dia)
 S_j - armazenamento do tramo j da propagação de vazões (mm)
 Q_{AFL} - contribuição das sub-bacias de montante (m^3s^{-1})
 A_{inc} - área da sub-bacia modelada (km^2)
 A_{tot} - área total da bacia modelada (km^2)
 β - coeficiente linear do modelo de propagação (dia^{-1})
 m - expoente do modelo de propagação (adimensional)
 n - número de reservatórios conceituais do algoritmo de propagação de vazões

Os estados das equações (11) e (12) estão sujeitas às seguintes restrições de saturação:

$$0 \leq X_1 \leq X_1^0 \quad (15)$$

$$0 \leq X_2 \leq X_2^0 \quad (16)$$

Onde:

X_1^0 - capacidade máxima da camada superior do solo (mm)

X_2^0 - capacidade máxima da camada inferior do solo (mm)

Os fluxos do modelo 3R são representados pelas equações (17) a (24):

$$SR = PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \quad (17)$$

$$INT = C_1 X_1 \quad (18)$$

$$ET_1 = PET \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right) \quad (19)$$

$$PR = C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} \quad (20)$$

$$ET_2 = (PET - ET_1) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (21)$$

$$GW = C_2 X_2 \quad (22)$$

$$BSF = \left[\frac{1}{1 + \mu} \right] GW + INT \quad (23)$$

$$RCG = \left[\frac{\mu}{1 + \mu} \right] GW \quad (24)$$

Onde:

PET - evapotranspiração potencial

RCG - recarga do aquífero, ou perda da vazão de base, constituindo um fluxo que não integra o conjunto que é medido no posto fluviométrico no exutório da bacia

As tabelas 3.9 e 3.10 listam os parâmetros das fases bacia e canal do modelo 3R, respectivamente.

TABELA 3.9 – PARÂMETROS DA FASE BACIA DO MODELO 3R

Parâmetro	Descrição	Unidade
X_1^0	Capacidade da camada inferior do solo	mm
X_2^0	Capacidade da camada superior do solo	mm
m_1	Expoente da função de escoamento superficial	adimensional
C_1	Taxa de recessão do escoamento subsuperficial	mês ⁻¹
m_2	Expoente da função de percolação	adimensional
m_3	Expoente da função de transpiração	adimensional
C_2	Taxa de recessão da camada inferior do solo	mês ⁻¹
C_3	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	adimensional
μ	Fração de recarga do aquífero	adimensional

FONTE: KRAUSKOPF NETO *et al.* (2007a)

TABELA 3.10 – PARÂMETROS DA FASE CANAL DO MODELO 3R

Parâmetro	Descrição	Unidade
B	Taxa de recessão da propagação	mês ⁻¹
M	Expoente da função de propagação	adimensional
N	Número de reservatórios conceituais na cascata	unidade

FONTE: KRAUSKOPF NETO *et al.* (2007a)

As equações de estado do modelo 3R são integradas numericamente com o uso do

método de Runge-Kutta de 4ª Ordem (PRESS *et al.*, 1986), a partir das condições iniciais dos armazenamentos dos reservatórios conceituais e da assimilação dos dados de entrada, que são os totais da chuva e evapotranspiração potencial médios na bacia, para cada intervalo de tempo. A integração é realizada com um número de passos variável em função da intensidade da precipitação, sendo que para os períodos sem chuva assume-se um número mínimo de passos para o intervalo de integração.

3.4.1.4 Calibração dos parâmetros

Os parâmetros do modelo 3R podem ser calibrados de forma manual ou automática. Para a calibração automática foi implementado o Método de Descida do Simplex no Espaço Multidimensional, desenvolvido por Nelder e Mead e descrito em Press *et al.* (1986), que é um método de otimização por busca direta e caracterizado pela sua grande robustez, embora não seja um otimizador global.

3.4.2 Modelo estocástico de atualização de estados

A seguinte descrição foi adaptada de Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007b).

O estimador de estado dinâmico-estocástico para o modelo 3R foi desenvolvido originalmente por Guetter e Georgakakos (1997), usando como referência o estimador desenvolvido para o modelo Sacramento, descrito em Georgakakos, Rajaram e Li (1988). O estimador é baseado no filtro de Kalman Estendido, que é a aplicação do filtro de Kalman para sistemas não-lineares (GELB, 1974).

O estimador proposto se desenvolve em duas etapas, uma de propagação e outra de atualização. Na etapa de propagação é obtida uma estimativa do estado do sistema e da matriz de covariâncias dos erros do estado para um instante no futuro. O modelo hidrológico, que representa a dinâmica dos fenômenos hidrológicos através de um sistema de equações diferenciais ordinárias de conservação de massa, é utilizado para prever o estado futuro do sistema que, por sua vez, é utilizado para estimar a matriz de covariâncias dos erros futura. Na etapa de atualização, tanto o estado como a matriz de covariâncias estimados na etapa de propagação são corrigidos utilizando a informação de grandezas medidas no sistema, que neste caso é a vazão medida na exutória da bacia. A vazão medida é assimilada em tempo real e comparada com a vazão calculada pelo modelo a partir dos dados de entrada (chuva e evapotranspiração potencial). Conhecida a dinâmica do sistema (modelo hidrológico) e

dispondo-se de uma formulação estocástica da natureza dos erros envolvidos (estado, parâmetros, dados de entrada e componente aleatória) é possível propagar, no sistema, o resíduo entre a vazão observada e modelada e com isto atualizar o estado deste sistema. Assim, o objetivo do estimador de estado é de atualizar o estado e a matriz de covariâncias dos erros do estado a partir da observação da vazão em tempo real.

As propriedades de observabilidade (capacidade de derivar o estado do sistema a partir de medições de grandezas observáveis deste sistema) e controlabilidade (capacidade de levar um sistema a um estado futuro determinado pela definição de suas variáveis de entrada) são fundamentais para o desenvolvimento do estimador dinâmico-estocástico (BRÁS E RODRÍGUEZ-ITURBE, 1990). A observabilidade completa assegura que o filtro seja estável, ou seja, que a variância da estimativa permaneça finita e convergente, independentemente das hipóteses iniciais com respeito à variância dos estados. A controlabilidade é necessária para conduzir um sistema dinâmico para qualquer solução. É impossível cobrir todas as nuances dos conceitos de observabilidade e controlabilidade neste estudo, entretanto deve-se assegurar que é mais simples derivar as condições de controlabilidade para sistemas determinísticos lineares (GELB, 1974). Na formulação descrita a seguir, será assumida a linearização das equações através da expansão em séries de Taylor e posterior truncamento.

3.4.2.1 *Formulação dinâmico-estocástica*

O estado de um sistema é definido como uma variável multidimensional que contém toda a informação relevante sobre o passado do sistema, informação necessária para o conhecimento do seu comportamento futuro, condicionado aos dados de entrada. As variáveis de estado representam a memória do sistema. Em modelos hidrológicos, as variáveis de estado são, geralmente, os armazenamentos nos reservatórios de solo e de canal.

O modelo chuva-vazão-propagação 3R, apresentado na seção 3.4.1, representa o sistema no espaço de estados, isto é, suas equações modelam diretamente as taxas de variação das variáveis de estado (armazenamentos de solo e canal). Sua representação sintética, explicitando os componentes que introduzem erros no sistema (modelo conceitual, representado pelo estado, entradas e parâmetros) é dada por:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t); \theta) + w(t) \quad (25)$$

Onde:

- t - tempo
- f - função vetorial não-linear que representa a formulação do modelo no espaço de estados
- x - vetor de estado, cujos componentes são as variáveis de cada estado do modelo
- u - vetor dos dados de entrada no modelo
- θ - vetor de parâmetros do modelo 3R
- w - vetor de erros (ruído branco) resultante das incertezas nos dados de entrada, na formulação do modelo e nos parâmetros, denominado forçante aleatória

O comportamento ao longo do tempo da matriz de covariância dos erros do estado pode ser representado por:

$$\frac{dP(t)}{dt} = F [x(t), u(t); \theta] P(t) + P(t) F^T [x(t), u(t); \theta] + Q(t) \quad (26)$$

Onde:

- P - matriz de covariância dos erros do estado do sistema
- F - matriz de sensibilidade aos estados, formada pela derivada parcial de cada uma das equações do modelo hidrológico em relação a cada um dos elementos do vetor de estados x
- Q - matriz de covariâncias da forçante aleatória do sistema, vetor w na equação (25)

As equações (25) e (26) são a representação perfeita do sistema, pois supõem que sejam conhecidos o modelo f , o estado x , as entradas u , os parâmetros θ e as propriedades estatísticas do erro w . Todavia, este conhecimento perfeito é uma abstração, pois somente se dispõem de aproximações dos valores e comportamentos para a representação do sistema hidrológico. Uma dificuldade adicional para aplicação da equação (26) é a definição da matriz Q de covariâncias de w , pois existe pouca informação “a priori” sobre ela.

3.4.2.2 Equações de propagação

Rajaram e Georgakakos (1987) *apud* Georgakakos, Rajaram e Li (1988) desenvolveram a equação (25) em série em torno dos valores aproximados de entradas e parâmetros, já que se supõe que o estimador de estado fornecerá valores de estado próximos aos reais, produzindo a seguinte representação para as equações de propagação de estados e covariâncias de erros dos estados:

$$\frac{d\hat{x}(t)^-}{dt} = f(\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta}) \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP(t)^-}{dt} = & F(\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta}) P(t)^- + P(t)^- F^T(\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta}) + \\ & + \alpha_U M(\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta}) U(t) M^T(\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta}) + \\ & + \alpha_P N(\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta}) W(t) N^T(\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta}) \end{aligned} \quad (28)$$

Onde:

- superscrito “-“ - indicador de estimativa “a priori” (antes da aplicação do estimador de estado)
- superscrito “^” - indicador de valor aproximado (valor com erro)
- U - matriz de covariância dos erros das entradas
- W - matriz de covariância dos erros dos parâmetros
- α_U - parâmetro adimensional, estimado a partir das diferenças entre vazões modeladas e observadas e que pondera a importância dos erros nos dados na matriz de covariâncias de erros do estado
- α_P - parâmetro adimensional que pondera a importância dos erros nos parâmetros na matriz de covariâncias de erros dos estados
- F - matriz de sensibilidade do sistema às variáveis de estado
- M - matriz de sensibilidade do sistema aos dados de entrada
- N - matriz de sensibilidade do sistema aos parâmetros

Os componentes das matrizes F , M , e N são representados pelas equações (29), (30) e (31).

$$\left[F(\hat{x}(t), \hat{u}(t); \hat{\theta}) \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i(\hat{x}(t), \hat{u}(t); \hat{\theta})}{\partial x_j} \quad (29)$$

$$\left[M(\hat{x}(t), \hat{u}(t); \hat{\theta}) \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i(\hat{x}(t), \hat{u}(t); \hat{\theta})}{\partial u_j} \quad (30)$$

$$\left[N(\hat{x}(t), \hat{u}(t); \hat{\theta}) \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i(\hat{x}(t), \hat{u}(t); \hat{\theta})}{\partial \theta_j} \quad (31)$$

A integração das equações (27) e (28) entre os instantes t_{k-1} e t_k fornece as estimativas “a priori” do estado e da matriz de covariâncias dos erros dos estados no instante t_k . Os parâmetros α_U e α_P são os dois parâmetros do estimador de estado, que devem ser estimados. Os parâmetros α_U e α_P , além de servirem para ajustar o estimador de estado,

também introduzem outra grande vantagem: se ocorrer uma melhoria no sistema, o modelo hidrológico com estimador de estado acoplado pode ser mantido sem modificações, necessitando-se apenas recalibrar os parâmetros α_U e α_P para os dados resultantes da nova situação do sistema. Os tipos de melhoria esperados são: (1) o adensamento da rede de monitoramento, (2) o aprimoramento na rotina de manutenção e calibração dos sensores, (3) o uso de estimativas de chuva por radar em substituição aos pluviômetros, (4) o uso de produtos integrados de estimativa de chuva com dados de radar, pluviômetro e satélite.

3.4.2.3 Equações de atualização

A atualização do estado e da matriz de covariâncias dos erros do estado é obtida através da aplicação do Filtro de Kalman Estendido, adaptação do Filtro de Kalman para sistemas não lineares (GELB, 1974).

O Filtro de Kalman utiliza abordagem Bayesiana (supõe conhecidas as distribuições de probabilidade do estado e das medições realizadas no protótipo e a distribuição condicional de probabilidades do estado dadas as medições) e busca a estimativa de mínima variância para o estado atualizado do sistema. Uma das grandes vantagens do Filtro de Kalman é sua recursividade: todo o histórico do sistema está presente na estimativa do estado atual do sistema, mas de maneira implícita, através da estimativa “a priori” do estado do sistema. O método trata o problema de estimação de estado de maneira consistente, no sentido que estima o estado real do sistema a partir de observações do protótipo, mas respeitando a história do sistema (concentrada na estimativa inicial do estado produzida pelo modelo), as relações que definem o comportamento deste sistema (modelo) e as incertezas associadas a todos os seus componentes.

O Filtro de Kalman Estendido é obtido, basicamente, pela linearização, através de expansões em série de Taylor em torno do estado estimado atual, das relações envolvidas (modelo e equação de medição, a ser definida) e a aplicação do mesmo procedimento empregado para o desenvolvimento do Filtro de Kalman para sistemas lineares.

Para a utilização do Filtro de Kalman Estendido, devem existir, para o sistema representado pela equação (25), fenômenos mensuráveis que possam ser associados ao estado do sistema. Esta relação pode ser modelada pela seguinte equação, denominada equação de medição:

$$\vec{z}(t) = \vec{h}(x(t), u(t); \theta) + \vec{v}(t) \quad (32)$$

Onde:

- \vec{z} - vetor da vazão medida
- \vec{h} - função vetorial não-linear que relaciona o estado, entradas e parâmetros do sistema com a vazão medida
- \vec{v} - vetor de erro (ruído branco) associado à medição da vazão, com matriz de covariância R

A vazão modelada (z') é computada através dos estados, dados de entrada e parâmetros estimados:

$$\vec{z}'(t) = \vec{h}(\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta}) \quad (33)$$

No caso do modelo 3R, o fenômeno mensurável é a vazão na exutória da bacia sendo modelada pela equação de propagação (KRAUSKOPF NETO, GUETTER e MINE, 2007a):

$$Q(t) = \beta (S(t))^m \quad (34)$$

Onde:

- Q - vazão na exutória da bacia
- S - estado do último reservatório da função de propagação
- β e m - coeficiente e expoente da função de propagação, respectivamente

Todavia, a variável de estado, S , está associada às demais variáveis de estado da propagação e também da fase bacia do modelo chuva-vazão (armazenamentos no solo).

A atualização do vetor de estado para um instante t usa como dados de entrada as estimativas “a priori” dos estados e da vazão e a vazão medida:

$$\hat{x}(t)^+ = \hat{x}(t)^- + \bar{K} \left[\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta} \right] \left\{ \vec{z}(t) - \vec{h} \left[\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta} \right] \right\} \quad (35)$$

Onde:

- $\hat{x}(t)^+$ - estimativas “a posteriori” (após atualização) do estado no instante t
- $\hat{x}(t)^-$ - estimativas “a priori” do estado no instante t
- \bar{K} - matriz de ganho de Kalman, definida pela equação (36)
- $\vec{z}(t)$ - vazão medida no instante t

$$\bar{K} \left[\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta} \right] = \bar{P}(t)^- \bar{H}^T \left[\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta} \right] \left\{ \bar{H} \left[\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta} \right] \bar{P}(t)^- \bar{H}^T \left[\hat{x}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\theta} \right] + \bar{R}(t) \right\}^{-1} \quad (36)$$

Onde:

- superscrito “-“ - estimativa “a priori”
 superscrito “+“ - estimativa “a posteriori”
 H - matriz que representa a linearização da função h , por expansão em série de Taylor, cujos elementos são descritos pela equação (37)
 P - matriz de covariância dos erros do estado do sistema
 R - matriz de covariâncias dos erros de medição

$$\left[\bar{H}(\bar{\hat{x}}(t), \bar{\hat{u}}(t); \hat{\theta}) \right]_{i,j} = \frac{\partial h_i \left[\bar{\hat{x}}(t), \bar{\hat{u}}(t); \hat{\theta} \right]}{\partial x_j} \quad (37)$$

A equação de atualização da matriz de covariâncias dos erros do estado é:

$$\begin{aligned} \bar{P}(t)^+ = & \left\{ 1 - \bar{K} \left[\bar{\hat{x}}(t)^-, \bar{\hat{u}}(t); \hat{\theta} \right] \bar{H} \left[\bar{\hat{x}}(t)^-, \bar{\hat{u}}(t); \hat{\theta} \right] \right\} \bar{P}(t)^- \\ & \left\{ 1 - \bar{K} \left[\bar{\hat{x}}(t)^-, \bar{\hat{u}}(t); \hat{\theta} \right] H \left[\bar{\hat{x}}(t)^-, \bar{\hat{u}}(t); \hat{\theta} \right] \right\}^T + \\ & + K \left[\bar{\hat{x}}(t)^-, \bar{\hat{u}}(t); \hat{\theta} \right] \bar{R}(t) \bar{K}^T \left[\bar{\hat{x}}(t)^-, \bar{\hat{u}}(t); \hat{\theta} \right] \end{aligned} \quad (38)$$

Onde:

- $P(t)^+$ - estimativa “a posteriori” (atualizada) da matriz de covariâncias dos erros do estado do sistema, para o instante t

3.4.2.4 Modelo de variância dos dados de entrada

Além das equações de atualização, o estimador de estado necessita da estimativa das variâncias dos erros nos dados de entrada (precipitação e evapotranspiração potencial) e nos dados de medição (vazão na exutória). Georgakakos, Rajaram e Li (1988) propuseram um modelo para as variâncias dos erros representado na equação (39). Esse modelo assume que os erros nos dados de entrada e nas vazões observadas são aleatórios, não-estacionários e proporcionais à magnitude dos dados.

$$VAR[\zeta(t)] = \left[C_{p1} \zeta(t) + C_{p0} \right]^2 \quad (39)$$

Onde:

- VAR - variância
 $\zeta(t)$ - dado de entrada (chuva e evapotranspiração potencial) ou observado (vazão)
 C_{p0} e C_{p1} - constantes positivas

As equações (40) a (42) indicam as variâncias dos erros da chuva, evapotranspiração potencial e da vazão observada, respectivamente.

$$VAR[PREC(t)] = [C_{PREC_1} PREC(t) + C_{PREC_0}]^2 \quad (40)$$

$$VAR[PET(t)] = [C_{PET_1} PET(t) + C_{PET_0}]^2 \quad (41)$$

$$R(t) = VAR[z(t)] = [C_{z_1} z(t) + C_{z_2}]^2 \quad (42)$$

Os seis parâmetros C_{PREC_0} , C_{PREC_1} , C_{PET_0} , C_{PET_1} , C_{Z_0} , C_{Z_1} do modelo de variâncias da precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada, são estimados em acordo com a expectativa que o especialista tem sobre a magnitude dos erros, levando em conta o tipo de instrumento, densidade da rede, manutenção dos equipamentos e características hidrometeorológicas da bacia. Por exemplo, se forem utilizados dados de precipitação no vale para aplicação nas cabeceiras da bacia, que normalmente apresentam efeitos orográficos, o especialista deve aumentar o valor dos parâmetros que estimam a variância dos erros nos dados de entrada para levar em conta o desvio de comportamento introduzido.

3.4.2.5 Parametrização dos erros

O resíduo normalizado (erro), para cada instante t , é representado pela equação (43).

$$\eta(t) = \sqrt{\vec{r}^T(t) [\vec{H}(t) \vec{P}(t) \vec{H}^T(t) + \vec{R}(t)]^{-1} \vec{r}(t)} \quad (43)$$

Onde:

$\eta(t)$ - resíduo normalizado da vazão

$r(t)$ - resíduo (erro) definido pela diferença entre a vazão modelada “a priori” e observada

$H(t)$ - matriz de sensibilidade da equação (37) de observação

$P(t)$ - matriz de covariância “a priori” dos erros dos estados do modelo, no instante t

Nota-se que os desvios padrão dos erros dos estados, dados de entrada e parâmetros correspondem à raiz quadrada da diagonal principal da matriz de covariâncias dos erros correspondentes (P , M , N).

Os desvios padrão dos erros dos estados (matriz P) são inicialmente definidos pelo especialista, pois somente afetam os primeiros dias da rodada do modelo. À medida que os dados são assimilados pelo sistema, os componentes de P convergem em acordo com as hipóteses assumidas no desenvolvimento do estimador de estado. Os desvios padrão dos

valores dos parâmetros são definidos pelo especialista, levando em conta as informações qualitativas sobre a importância absoluta e relativa dos parâmetros na bacia sendo modelada, coletadas durante o processo de calibração, em especial na calibração manual (KRAUSKOPF NETO, GUETTER e MINE, 2007a).

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS VAZÕES PREVISTAS

A metodologia proposta por Georgakakos *et al.* (2004) baseia-se em análise de valor médio e análise probabilística completa. Em uma das técnicas utilizadas, denota-se por $F(t)$ a probabilidade que um evento $Q(t) > Q_0$ irá ocorrer no tempo t como determinado pela simulação para o tempo t , com $Q(t)$ representando a vazão no tempo t e Q_0 um valor de vazão de referência. $O(t)$ é a vazão observada independente da ocorrência de Q_0 . A distribuição de probabilidade conjunta de simulações e observações ($p(F(t), O(t))$) caracteriza completamente as simulações e observações:

$$p(F(t), O(t)) = p(O(t) | F(t))p(F(t)) \quad (44)$$

Onde $p(O(t) | F(t))$ é a distribuição de probabilidades condicional que descreve a frequência de ocorrência de um valor de referência (Q_0) para todos os tempos t para os quais a frequência dos valores simulados estava no intervalo $f_i^L < F(t) < f_i^H$, onde f_i^L e f_i^H são as fronteiras de frequência específica inferior e superior, respectivamente, que dividem o intervalo $[0,1]$ em subintervalos, como decis, quartis, etc. A distribuição de probabilidades marginal $p(F(t))$ descreve a frequência de uso de várias frequências de ocorrência do evento pelo conjunto de simulação no intervalo $[0,1]$.

A distribuição de probabilidades definida pela equação (44) é conhecida como distribuição condicional e é utilizada para examinar a confiabilidade das simulações do conjunto examinado, e também para avaliar a resolução das simulações, isto é, a existência de diferenças significativas entre médias condicionais das observações dado as frequências de simulação, para diferentes frequências de simulação. A distribuição de probabilidades marginal é utilizada para examinar a precisão das simulações do conjunto.

Outra técnica utilizada por Georgakakos *et al.* (2004) é a curva ROC (Receiver Operating Characteristic Curve). Esta curva representa a probabilidade de detecção de um evento ($Q > Q_0$) versus a probabilidade de falso alarme (frequência relativa dos casos em que o evento foi simulado, mas não foi observado) na faixa das frequências simuladas. Quanto

maior a área abaixo da curva e acima da diagonal (área ROC), maior a precisão da simulação.

As métricas escalares de precisão da simulação empregadas no estudo de Georgakakos *et al.* (2004) são o “Brier Score – BS” e o “Brier Skill Score – BSS”, definidas como:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (f(t) - o(t))^2 \quad (45)$$

$$BSS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (f(t) - o(t))^2}{\sum_{t=1}^N (c(t) - o(t))^2} \quad (46)$$

Onde $f(t)$ é a frequência simulada do evento alvo no tempo t estimada pela fração dos membros do conjunto de simulação que satisfazem $Q > Q_0$; $c(t)$ é a frequência climatológica do evento no passo de tempo t ; $o(t)$ é igual a 1 se a $Q(t)$ observada no tempo t satisfaz $Q(t) > Q_0$, ou igual a 0 caso contrário; e N é o número de intervalos de tempo registrados.

Quanto menor o valor de BS, maior a precisão da simulação. Também se considera a decomposição de BS em componentes escalares: confiabilidade (primeiro), resolução (segundo) e incerteza (terceiro):

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^M N_t (f_t(t) - \bar{o}_t(t))^2 - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^M N_t (\bar{o}_t(t) - \hat{o})^2 + \hat{o}(1 - \hat{o}) \quad (47)$$

Onde $f_t(t)$ é a frequência simulada discretizada em M partes (por exemplo, decic) na faixa de $[0,1]$; \bar{o}_t é a frequência relativa observada de ocorrência do evento alvo quando a frequência de simulação é $f_t(t)$; e \hat{o} é a frequência relativa climatológica observada independente do evento alvo.

Distribuições empíricas de frequência acumulativa de vazão horária observada foram empregadas para avaliar qual a porcentagem das observações que apresentaram valor maior que Q_0 .

Um modelo paramétrico concentrado calibrado (LMP) e um modelo paramétrico distribuído calibrado (HRC) foram utilizados para produzir 100 realizações cada, utilizando-se uma aproximação de Monte Carlo e amostrando-se do espaço paramétrico mais adequado.

Estimativa empírica das distribuições condicional e marginal da equação (44) e construção de diagrama de confiabilidade também são sugeridas por Georgakakos *et al.* (2004). Normalmente, utiliza-se decic para subdividir o intervalo $[0,1]$.

Para avaliar o grau de incerteza nas previsões de vazões geradas nesse trabalho, foram utilizadas as seguintes métricas estatísticas nas comparações entre vazões observadas e

previstas e entre vazões modeladas e previstas: média e desvio padrão médios dos erros, correlação entre vazões previstas e observadas. Também foi avaliada a taxa de acerto e erro nas previsões de chuva e vazão comparando-se anomalias observadas e previstas (gráficos de correlação).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 BACIA DO RIO GRANDE – USINA DE FURNAS

4.1.1 Variabilidade espaço-temporal das vazões naturais

A variabilidade espacial foi verificada através da análise da distribuição espacial do deflúvio médio de longo termo (1942-2007) para os aproveitamentos selecionados nas três bacias do SIN nas regiões Sul/Sudeste.

A análise da variabilidade sazonal e interanual das vazões naturais para cada bacia foi expressa em unidades de deflúvio (razão entre vazão e área da bacia hidrográfica incremental), ou seja, mm/mês para a análise sazonal e mm/ano para a análise interanual.

4.1.1.1 Variabilidade sazonal

A figura 4.1 ilustra o ciclo anual dos deflúvios no Rio Grande, em Furnas, incluindo uma banda de variação de um desvio padrão.

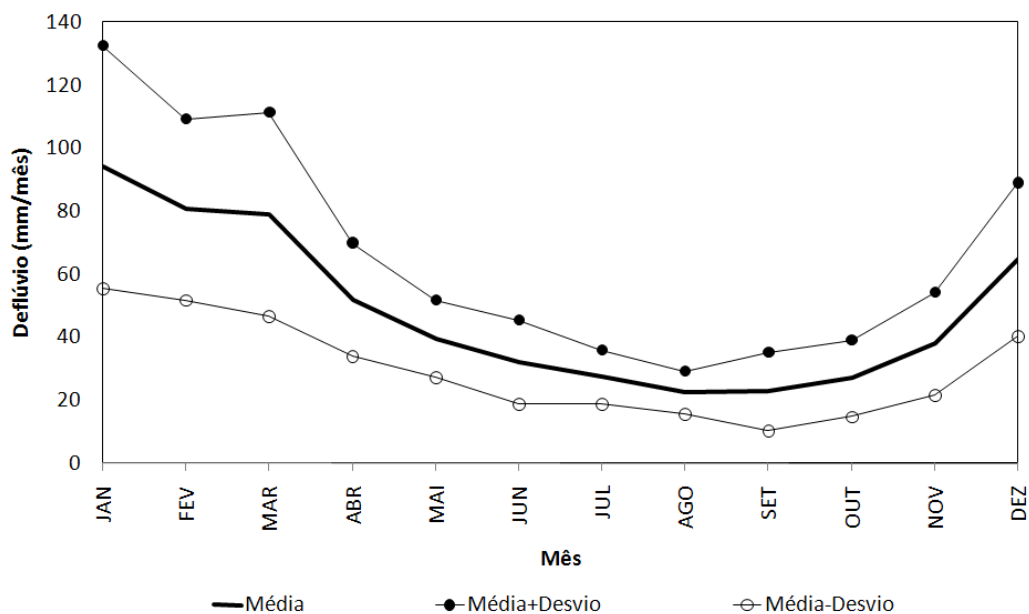


FIGURA 4.1 – CICLO ANUAL DOS DEFLÚVIOS PARA O RIO GRANDE EM FURNAS

O deflúvio médio de longo termo no Rio Grande, em Furnas, é 578 mm/ano e seu desvio padrão é 170 mm/ano para o período 1942-2007. O período selecionado para a verificação do índice de acerto das previsões mensais de vazão foi 1987-2001, cuja média e desvio padrão são 540 mm/ano e 116 mm/ano, respectivamente.

As vazões variam com sazonalidade bem definida, sendo dezembro-março o período úmido e julho-setembro o período seco. Na média, o máximo do ciclo anual ocorre em janeiro, com mais de 90 mm/mês, e o mínimo em agosto-setembro, com menos de 25 mm/mês. Em outubro inicia a subida do hidrograma e o período de recessão se estende de março a agosto. Os meses com maior variabilidade de vazões são janeiro e março, e o mês com menor variabilidade é agosto.

Para Furnas, o volume útil do reservatório é igual a 17217 hm^3 (tabela 3.8), o que equivale a $17217 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, e a MLT é igual a $80 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}$. Desse modo, o índice de armazenamento corresponde a aproximadamente 215 dias, o que mostra que o reservatório de Furnas tem papel importante na regularização das vazões no rio Grande.

Como a sazonalidade é definida, pode-se calcular a capacidade de regularização sazonal deste reservatório. Para Furnas, obteve-se essa medida como sendo igual a 1,6.

4.1.1.2 Variabilidade interanual

A figura 4.2 ilustra a série dos deflúvios anuais no Rio Grande, em Furnas. Nessa figura o período de verificação das previsões de vazão, 1987-2001, está destacado com a linha mais grossa, com círculos.

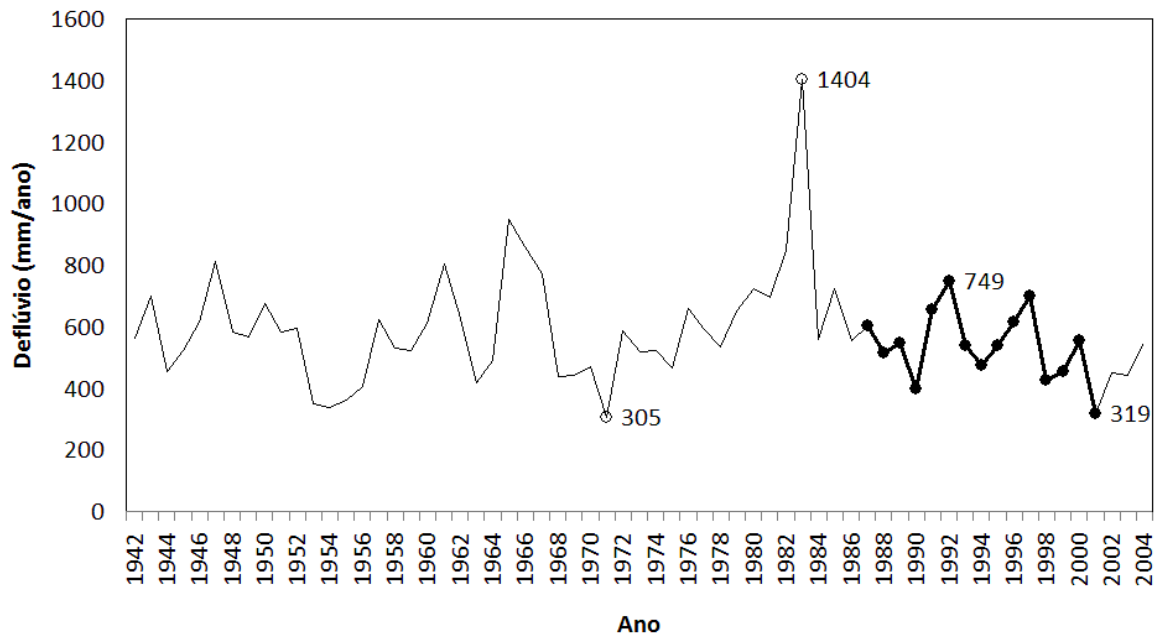


FIGURA 4.2– VARIABILIDADE INTERANUAL DOS DEFLÚVIOS EM MM/ANO PARA O RIO GRANDE EM FURNAS

O deflúvio anual máximo da série ocorreu em 1983, com 1404 mm/ano, e o mínimo foi registrado em 1971, com 305 mm/ano. O período de verificação selecionado apresentou o máximo anual em 1992, com 749 mm/ano, e o mínimo em 2001 com 319 mm/ano. Portanto, o período de verificação apresenta um evento seco da ordem de grandeza do mínimo da série histórica, mas o evento úmido em 1992 teve metade da magnitude do maior evento úmido da série (em 1983).

A figura 4.3 mostra a variabilidade do deflúvio em mm/mês para o período de verificação 1987 - 2001. Nota-se que nos anos finais da série, que correspondem a 1998, 1999 e 2001, os valores das menores vazões (escoamento de base) diminuem se comparadas às vazões de base do restante da série histórica. Isto pode ser resultado de ações antrópicas, como aumento do uso consuntivo da água dos reservatórios, ou pode ser decorrente de falhas de manipulação dos dados de vazão natural para esses anos.

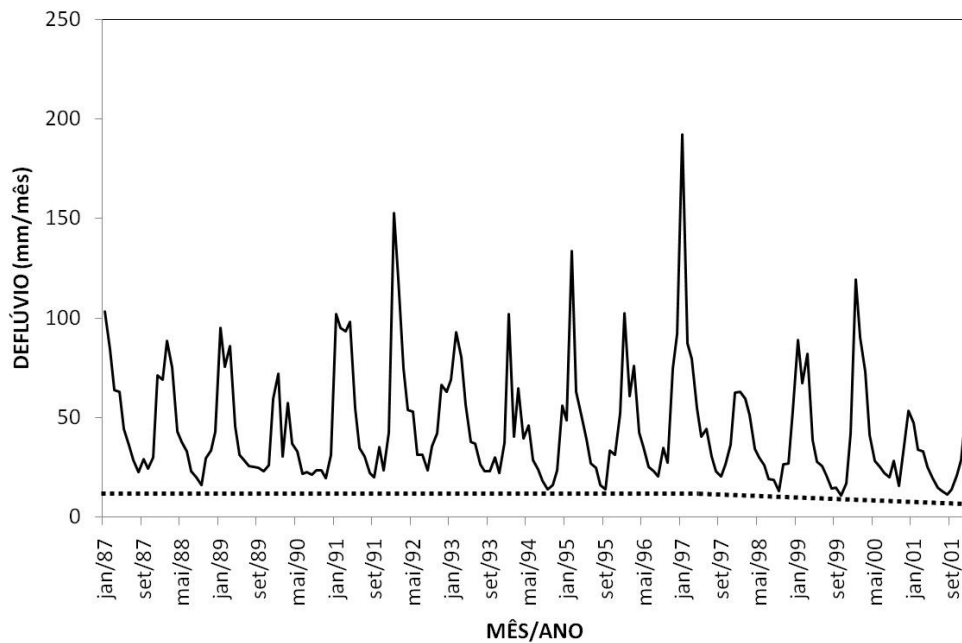


FIGURA 4.3 – VARIABILIDADE INTERANUAL DOS DEFLÚVIOS EM MM/MÊS PARA O RIO GRANDE EM FURNAS NO PERÍODO 1987 – 2001

4.1.2 Análise da previsão de chuvas

Para estimar os valores de chuva prevista a partir dos dados provenientes do EUROBRISA, é necessário relacionar a anomalia média prevista e o desvio padrão previsto com uma média de longo termo para a chuva. A média utilizada foi aquela obtida a partir da chuva observada em pluviômetros para o período de 1987 a 2001. Todos os valores devem se referenciar a trimestres, porque os dados de anomalia e desvio padrão previstos fornecidos são trimestrais. Sendo assim, a média da chuva observada deve ser transformada de mensal para trimestral calculando-se a média a cada 3 meses.

Considerou-se que os dados de anomalia prevista obedecem a uma distribuição normal, em que a variável Z é calculada através de:

$$Z = \frac{X - \mu}{\bar{\sigma}} = \frac{anom_{prev}}{\bar{\sigma}_{prev}} \quad (48)$$

Onde:

- X - valor de chuva prevista, o qual se deseja obter
- μ - média climatológica de chuva observada
- $\bar{\sigma}$ - desvio padrão relacionado às distribuições de chuva

$anom_{prev}$ - anomalia prevista (fornecida pelo EUROBRISA)

$\bar{\sigma}_{prev}$ - desvio padrão relacionado às previsões de chuva (fornecido pelo EUROBRISA)

O termo $X - \mu$ pode ser substituído pelos valores de anomalia prevista $anom_{prev}$, e desse modo é possível calcular o valor de Z .

Isolando-se X na equação (48), tem-se:

$$X = Z\bar{\sigma} + \mu \quad (49)$$

O valor de Z foi calculado através da equação (48) e utilizando os dados de anomalia e desvio padrão previstos. É possível relacionar Z com os valores de média climatológica e desvio padrão observados em pluviômetros (μ_{obs} e $\bar{\sigma}_{obs}$, respectivamente), através da equação (49). Desse modo, a chuva prevista trimestral X é calculada pela relação expressa na equação (50):

$$X = Z\bar{\sigma}_{obs} + \mu_{obs} \quad (50)$$

O gráfico da figura 4.4 mostra a chuva prevista, calculada a partir dos dados fornecidos pelo EUROBRISA, e a chuva observada, ambas referindo-se a médias trimestrais, para o aproveitamento hidrelétrico de Furnas.

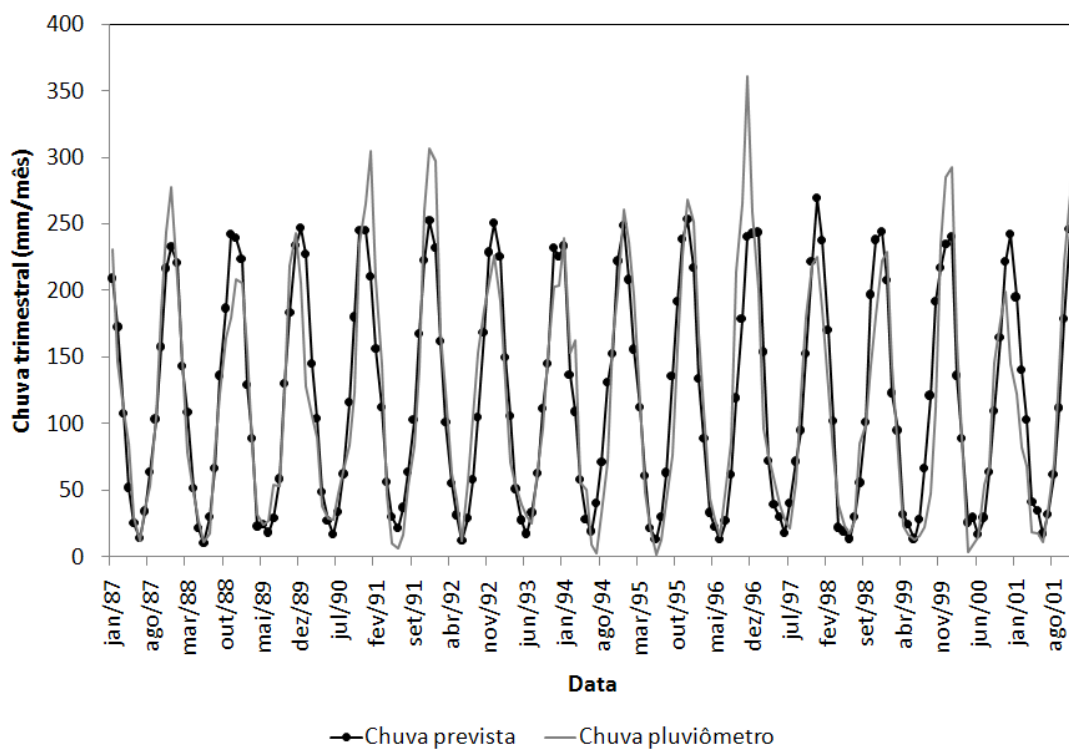


FIGURA 4.4 – VALORES DE CHUVA OBSERVADA E CHUVA PREVISTA PARA O APROVEITAMENTO DE FURNAS (PERÍODO 1987 – 2001)

A comparação dos dados trimestrais de chuva prevista com os dados trimestrais de chuva observada resultou em erro médio (média das diferenças entre chuva prevista e chuva observada) aproximadamente igual a 0,6 mm/mês e desvio padrão de 33,6 mm/mês (tabela 4.1). A maioria dos picos de chuva observada foi bem representada pela chuva prevista, exceto nos casos em que houve a ocorrência de chuva em maior quantidade que a média climatológica (anos de 1988, 1991, 1992, 1997 e 2000) e anos em que a chuva observada foi menor do que a média (anos de 1989, 1993, 1998 e 2001). De modo geral, nos períodos de estiagem, a chuva prevista representa adequadamente a chuva observada. Observa-se que a previsão de chuvas foi conservadora, pois apresentou praticamente os mesmos valores para os picos de chuva, próximos a 250 mm/mês.

TABELA 4.1 – ERRO MÉDIO, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE CHUVA OBSERVADA E CHUVA PREVISTA PARA O APROVEITAMENTO DE FURNAS

Aproveitamento hidrelétrico	Furnas
Erro médio (mm/mês)	0,6
Desvio padrão (mm/mês)	33,6
Coefficiente de correlação	0,92

A figura 4.5 mostra a frequência acumulada da chuva prevista e da chuva observada obtida pela média dos dados dos pluviômetros. A chuva prevista representou a chuva observada adequadamente para a maioria dos percentis. Para o percentil de 50% (chuvas de até 100 mm/mês), a chuva prevista superestimou a chuva ocorrida, e para os percentis acima de 90%, a previsão subestimou a chuva.

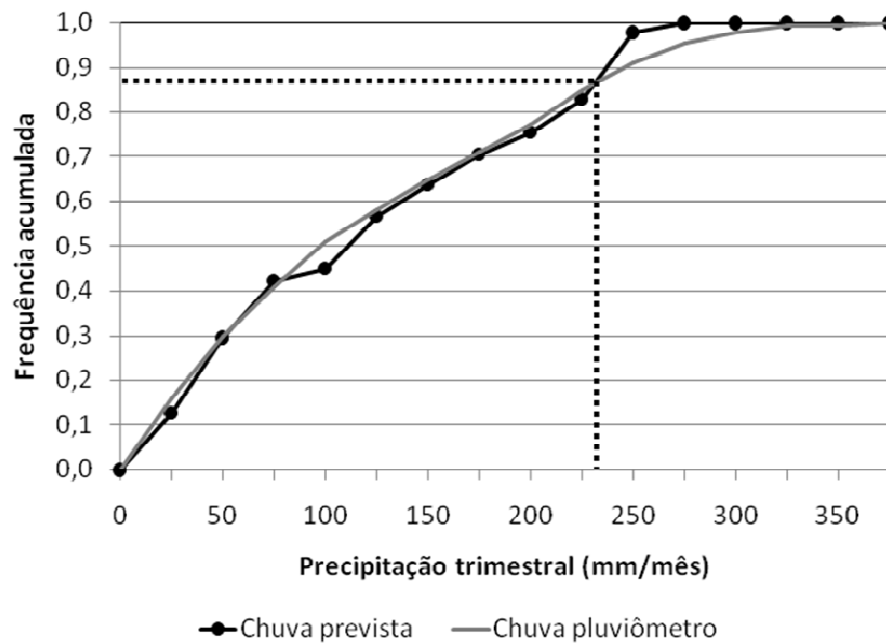


FIGURA 4.5 – FREQUÊNCIA ACUMULADA DAS PRECIPITAÇÕES OBSERVADA E PREVISTA EM RESOLUÇÃO TRIMESTRAL EM FURNAS

4.1.3 Análise da consistência conjunta dos dados mensais

Uma das maiores dificuldades para se obter uma boa modelagem de vazões, usando como dados de entrada a chuva e evaporação potencial, é assegurar que as séries de dados de entrada sejam consistentes entre si. Portanto, foi selecionado um modelo de balanço hídrico mensal (rotina “balmes.f”, descrita na seção 3.2.4) para estimar a variação do armazenamento da água no solo para o período 1987-2001. Se o armazenamento da água no solo se comportar de maneira estacionária, e se o armazenamento máximo não for um valor excessivamente alto, então há grande probabilidade de que os dados de chuva, evaporação potencial e vazão sejam consistentes entre si. Os eventos inconsistentes ocorrem quando o hidrograma sobe, sem que haja registro de chuva ou com valores muito baixos, neste caso é necessário que o armazenamento no solo seja muito elevado para que se possa produzir o evento úmido, sem a chuva correspondente. Outro tipo de inconsistência ocorre quando houver muita chuva e não houver registro de subida do hidrograma, neste caso também é necessário que o armazenamento seja muito alto para absorver o “excesso” de chuva sem produzir aumento significativo de vazão.

A análise de consistência foi aplicada para os dois tipos de dado de chuva (observada do pluviômetro e prevista), em conjunto com a série de vazões naturais mensais

do ONS para o Rio Grande, em Furnas, e para os dados climatológicos de evaporação potencial. Como a série de evaporação potencial não estava disponível para o período 1987-2001, então foi assumido que a evaporação potencial mensal era equivalente à média de longo termo para o referido mês; dessa forma foi introduzido um coeficiente multiplicador da evapotranspiração potencial climatológica para estimar valores de evapotranspiração que fossem consistentes com o balanço hídrico. A Figura 4.6 ilustra o comportamento do armazenamento no solo, obtido através do modelo “balmes.f” para três diferentes coeficientes multiplicadores da evapotranspiração potencial.

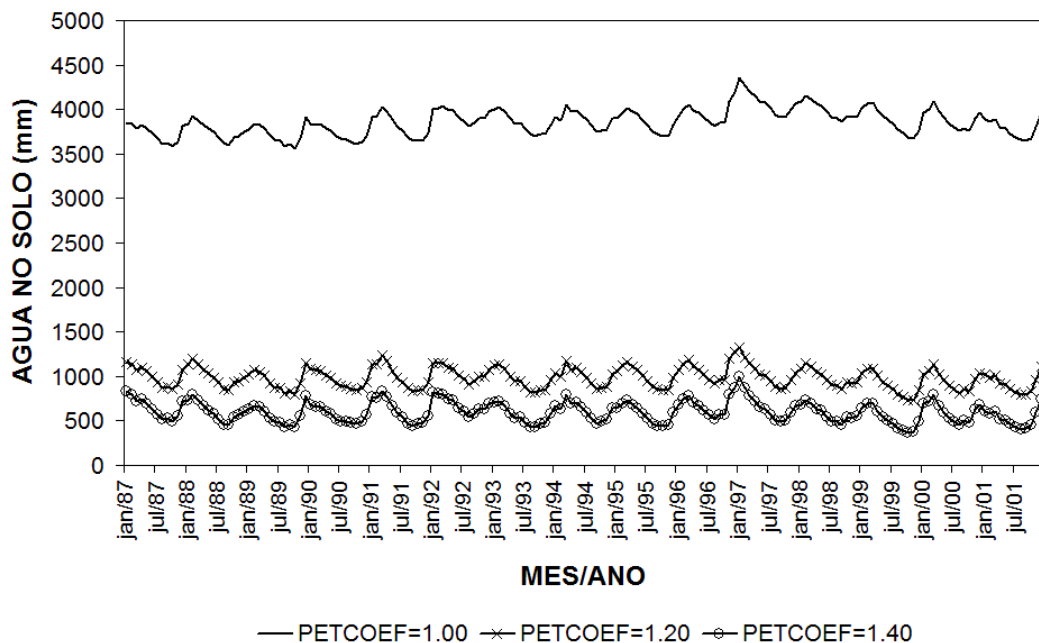


FIGURA 4.6 – VARIAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA A CHUVA ESTIMADA COM TRÊS PLUVIÔMETROS EM FURNAS, APLICANDO-SE TRÊS DIFERENTES COEFICIENTES PARA A CORREÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (1,0; 1,2 E 1,4)

Observa-se que os dados climatológicos de evapotranspiração potencial requerem que o armazenamento da água no solo seja superior a 4000 mm, que é um valor excessivamente alto. Então foi aplicado um coeficiente de 1,2 para majorar os valores climatológicos de evapotranspiração potencial, que produziu um armazenamento da ordem de 1000 mm e uma variabilidade da ordem de 300 mm. Aumentando ainda mais o coeficiente para 1,4, então o armazenamento cai para aproximadamente 800 mm. A conclusão desta análise é que a evapotranspiração potencial climatológica foi subestimada e deve ser majorada em 20%; se a evapotranspiração potencial for aumentada ainda mais (o caso de 1,4), então o armazenamento no solo resultante da aplicação do coeficiente 1,4 varia pouco em relação ao armazenamento resultante da aplicação do coeficiente 1,2.

A figura 4.7 ilustra o armazenamento no solo obtido para as séries de chuva

observada e chuva prevista. Em ambos os casos os valores da série de chuva produziram armazenamentos no solo compatíveis com a variabilidade conjunta da chuva, vazão e evapotranspiração potencial.

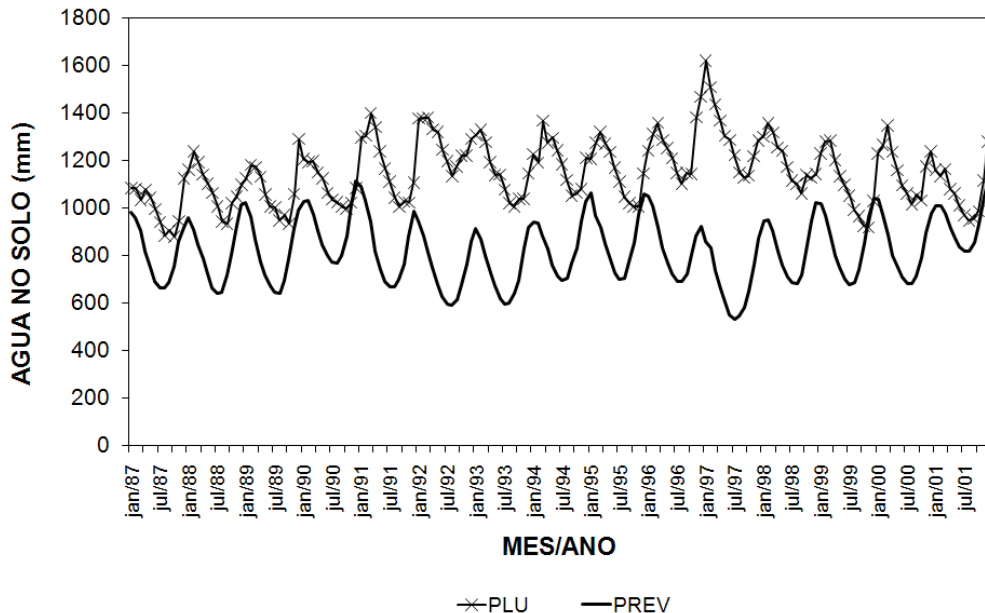


FIGURA 4.7 – INTERCOMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA A CHUVA DOS PLUVIÔMETROS E CHUVA PREVISTA EM FURNAS

4.1.4 Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico 3R

A calibração do modelo 3R foi desenvolvida para Furnas na Bacia do Grande para o período jan/1987-dez/2001. Os dados de entrada foram: evapotranspiração potencial majorada pelo coeficiente 1,2, série da chuva média na bacia e a série dos deflúvios naturalizados mensais.

O modelo 3R simula a vazão (chamada de vazão modelada) a partir do balanço hídrico de duas camadas do solo, que por sua vez é comparada com a série de vazões naturais do ONS (chamada de vazões observadas). A calibração foi efetuada automaticamente com a aplicação do algoritmo de otimização “*SIMPLEX*”. A calibração consiste em se estimar o vetor de parâmetros, com oito dimensões, através da minimização da função objetivo. A função objetivo foi definida como sendo a média de dois parâmetros de erro para os 180 meses da série de dados. Os parâmetros de erro foram o resíduo médio (diferença entre a vazão modelada e observada) e o desvio padrão do resíduo; o primeiro termo visa estimar os parâmetros associados com a vazão de base e as vazões de recessão e o segundo termo é mais

adequado para otimizar os parâmetros associados com o escoamento superficial.

A calibração usou como dado de entrada a série da chuva média na bacia estimada a partir da média aritmética dos registros de pluviômetros. Os parâmetros calibrados são apresentados na tabela 4.2.

TABELA 4.2 – PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R USANDO-SE A CHUVA DOS PLUVIÔMETROS COMO DADO DE ENTRADA PARA FURNAS

Parâmetro	Descrição	Valor
X_1^o	Capacidade da camada superior do solo	879 mm
X_2^o	Capacidade da camada inferior do solo	1180 mm
m_1	Expoente da função de escoamento superficial	1,539
C_1	Taxa de recessão do escoamento subsuperficial	0,0043 mês ⁻¹
m_2	Expoente da função de percolação	1,8
m_3	Expoente da função de transpiração	1,0
C_2	Taxa de recessão da camada inferior do solo	0,0232 mês ⁻¹
C_3	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	75,75
μ	Define fração de recarga do aquífero	0,0514
β	Taxa de recessão da propagação	2,571 mês ⁻¹
m	Expoente da função de propagação	1,0
n	Número de reservatórios conceituais na cascata	2

Nota-se que o valor calibrado do parâmetro $C_1=0,0043 \text{ mês}^{-1}$ foi muito baixo, esse coeficiente representa a taxa de recessão do escoamento subsuperficial, ou seja, a escala de tempo para que o volume da água armazenada na camada superior escoe como fluxo subsuperficial. Nesse caso a escala de tempo da recessão do escoamento sub-superficial foi 232 meses (quase 20 anos), ou seja, o escoamento sub-superficial simulado é muito pequeno. Se a camada de solo superior estiver saturada $X_1=879 \text{ mm}$, então o valor mensal do escoamento subsuperficial será $INT=C_1X_1$, ou seja, $INT=0,0043*879=3,8 \text{ mm mês}^{-1}$. Analogamente, o coeficiente $C_2=0,0232 \text{ mês}^{-1}$ corresponde à taxa de recessão do escoamento originado da camada inferior do solo (escoamento de base e recarga do aquífero), cuja escala de tempo é de 43 meses (quase 2 anos). Se a camada inferior do solo estiver saturada, então a soma da vazão de base e recarga corresponde à $GW=C_2X_2$, ou seja, $GW=0,0232*1180=27,4 \text{ mm mês}^{-1}$.

O escoamento de base foi considerado como sendo a soma do escoamento subsuperficial e o escoamento produzido pela camada inferior reduzido da vazão de recarga do aquífero. Então o valor máximo dos fluxos de base e de recarga simulados são $28,8 \text{ mm mês}^{-1}$ e $1,4 \text{ mm mês}^{-1}$, respectivamente, que ocorreriam se tanto as camadas do solo superior e inferior estivessem saturadas.

A tabela 4.3 lista as médias de longo termo (1987-2001) dos fluxos observados e

simulados. A precipitação e evapotranspiração potencial são dados de entrada para o modelo 3R, a vazão observada é usada para estimar os erros da simulação. A vazão simulada corresponde à saída do modelo 3R, sendo composta pelas simulações do escoamento superficial e pelo escoamento de base (que incluiu o escoamento subsuperficial).

TABELA 4.3 – MÉDIAS DOS FLUXOS OBSERVADOS E SIMULADOS ANUAIS PARA A CALIBRAÇÃO COM CHUVA ESTIMADA POR PLUVIÔMETROS PARA O PERÍODO 1987-2001 EM FURNAS

Fluxo	Observado (mm ano⁻¹)	Simulado (mm ano⁻¹)
Chuva	1412	
Evapotranspiração Potencial	1049	
Evapotranspiração Real		857
Vazão	539	542
Escoamento Base		244
Escoamento Superficial		322
Recarga do Aquífero		12

Na tabela 4.3 se observa que o coeficiente de escoamento da bacia (razão entre vazão e chuva) é 0,38, ou seja, em média 38% da chuva escoou no rio; a evapotranspiração real simulada corresponde a 82% da evapotranspiração potencial. O modelo 3R estimou que a vazão de base e o escoamento superficial corresponderam a 45% e 59% da vazão no rio, respectivamente.

Os resultados da calibração para Furnas produziram erros médios inferiores a 1% e a correlação entre as vazões observadas e simuladas foi $\rho=0,93$. A figura 4.8 ilustra a comparação entre as vazões observada e modelada para o período 1987-2001, com a chuva média na bacia estimada a partir dos pluviômetros.

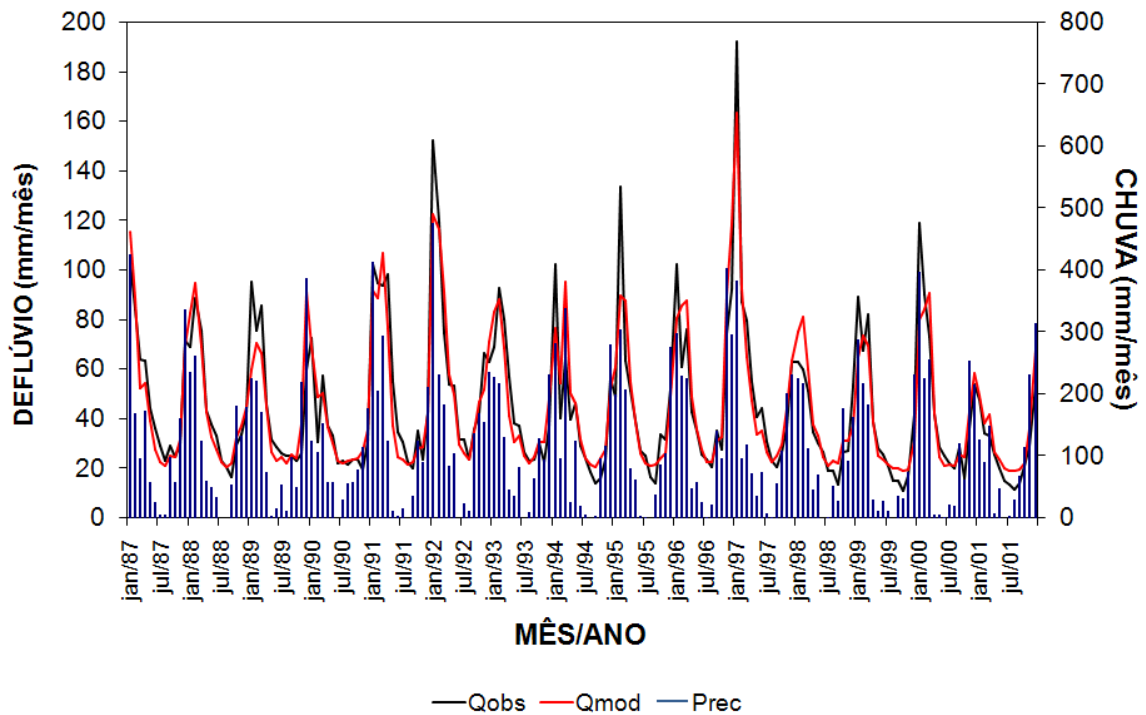


FIGURA 4.8– COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADA E OBSERVADA PRODUZIDAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA DE PLUVIÔMETROS EM FURNAS

O modelo simulou adequadamente a fase e os picos do hidrograma. Os picos das vazões simuladas foram subestimadas nos verões de 1989, 1992, 1995, 1997 e 2000 e foi superestimado no verão 1998.

A figura 4.9 apresenta a simulação dos armazenamentos acumulados nas camadas superior e inferior do solo. Os armazenamentos da água no solo seguem o ciclo anual, mas estão defasados em relação à fase do ciclo das chuvas e vazões. Enquanto a chuva e a vazão tem um pico em janeiro e um mínimo em julho, o ciclo do armazenamento no solo atinge o pico em junho e o mínimo em outubro, isto é, o armazenamento no solo é mínimo no início da estação chuvosa. Os valores dos máximos e mínimos do armazenamento nas camadas superior e inferior do solo variam de ano para ano, conforme ilustram as figuras 4.10 e 4.11 que indicam o armazenamento máximo e mínimo de cada ano para as camadas superior e inferior do solo, respectivamente.

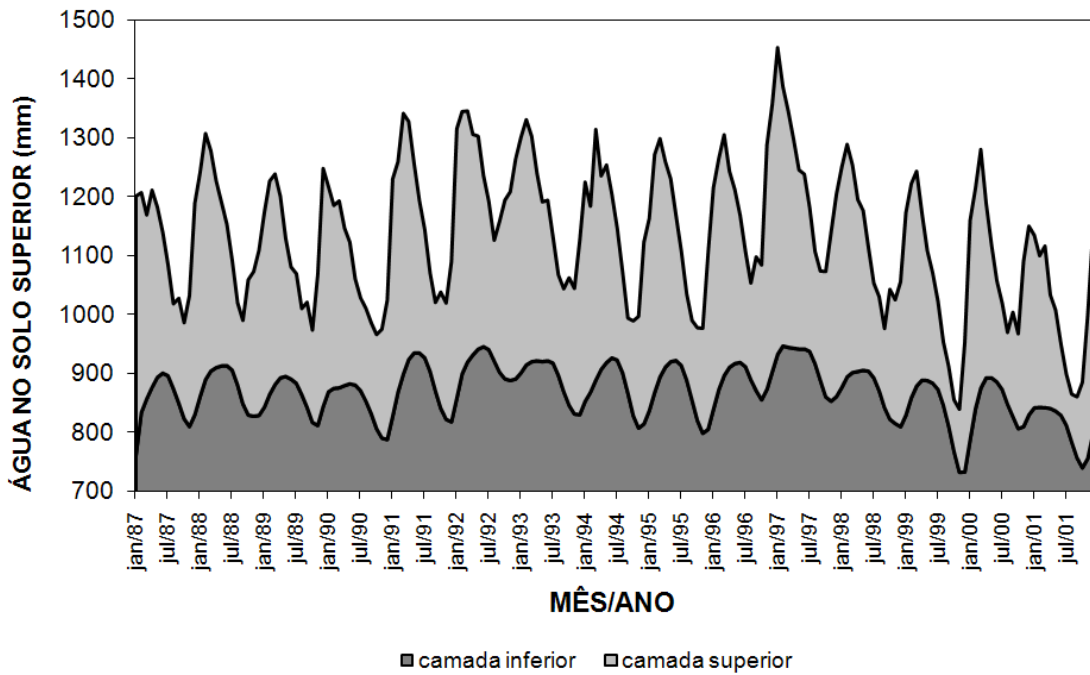


FIGURA 4.9 – VARIABILIDADE DO ARMAZENAMENTO NAS CAMADAS INFERIOR E SUPERIOR DO SOLO SIMULADAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA DE PLUVIÔMETROS EM FURNAS

mês	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
JAN	439.8	380.5	329.9	348.4	403.2	457.4	399.9	372.2	326.5	376.2	520.9	374.0	343.5	373.1	293.3
FEV	373.5	417.9	362.1	310.6	391.4	445.3	416.4	315.8	404.0	392.4	439.9	394.8	363.5	374.1	257.5
MAR	312.3	373.8	357.5	317.3	442.7	426.2	382.7	425.5	404.7	408.9	400.7	352.4	364.7	405.3	274.3
ABR	334.8	316.6	308.0	267.3	404.0	374.5	318.3	328.5	349.0	332.7	354.2	291.8	283.8	296.9	193.0
MAI	288.9	277.2	233.9	240.2	322.9	361.5	270.9	335.4	310.3	295.4	303.9	271.2	220.5	226.3	171.5
JUN	239.3	240.0	190.3	180.1	259.0	290.0	272.5	278.0	245.8	249.2	296.6	209.1	187.3	171.9	121.2
JUL	188.2	186.3	186.0	157.4	217.7	251.1	213.9	224.0	194.0	195.1	243.7	160.7	149.3	146.8	87.1
AGO	143.9	139.5	145.9	157.4	167.1	205.0	170.6	171.4	146.6	164.3	190.5	159.9	107.3	121.8	81.2
SET	177.9	141.6	178.3	154.3	149.9	256.4	174.5	127.5	135.6	227.2	185.7	134.4	101.7	176.9	103.5
OUT	162.9	229.6	156.6	159.7	197.3	303.3	216.2	160.7	157.5	228.6	212.7	220.5	87.7	161.1	145.2
NOV	222.0	245.3	257.0	185.0	197.2	320.4	213.3	189.6	178.1	415.2	286.5	210.1	107.0	280.8	243.9
DEZ	359.1	280.1	404.5	236.6	272.2	373.2	296.0	309.0	298.9	454.2	343.3	246.0	219.4	320.3	345.5

FIGURA 4.10 – PERÍODO DO ARMAZENAMENTO MÁXIMO (AZUL) E MÍNIMO (VERMELHO) DE CADA ANO NA CAMADA SUPERIOR DO SOLO

mês	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
JAN	763.3	863.3	844.8	871.3	829.3	860.4	903.3	854.9	839.0	841.5	934.6	878.6	831.6	789.3	843.9
FEV	835.9	891.7	866.9	877.0	870.6	901.6	916.7	870.4	869.9	874.8	949.0	896.5	860.8	841.9	844.7
MAR	859.1	906.3	883.3	878.0	901.0	921.7	922.4	891.0	896.3	898.6	946.6	904.0	880.9	877.3	844.3
ABR	878.6	912.3	894.9	881.7	925.9	933.7	923.8	909.2	913.0	912.8	945.1	905.7	890.9	894.7	842.9
MAI	895.7	915.2	897.3	884.7	937.0	943.6	922.6	920.8	922.3	919.1	943.8	907.6	890.3	895.0	838.4
JUN	902.8	915.7	892.7	882.7	937.1	947.8	923.9	928.8	924.3	921.0	944.1	906.2	885.8	888.0	831.1
JUL	898.4	907.9	885.6	873.2	929.0	942.7	920.0	925.1	915.8	913.8	939.8	894.7	875.3	875.0	814.3
AGO	876.4	882.9	866.6	855.4	905.8	923.6	899.0	904.0	890.8	891.6	919.1	872.7	848.5	850.1	785.9
SET	851.9	850.7	844.8	833.9	872.9	904.3	871.6	868.7	856.7	873.0	890.4	844.2	812.7	829.2	759.0
OUT	825.5	831.7	819.2	808.5	843.1	893.3	848.3	830.9	822.4	857.6	862.6	824.5	769.6	808.5	742.0
NOV	812.2	829.7	813.9	792.5	824.5	890.4	833.5	809.5	800.7	875.1	855.2	817.2	734.5	812.0	757.9
DEZ	832.1	831.1	845.8	790.1	820.0	892.9	832.4	816.6	807.5	905.2	863.0	811.8	734.9	832.0	800.1

FIGURA 4.11 – PERÍODO DO ARMAZENAMENTO MÁXIMO (AZUL) E MÍNIMO (VERMELHO) DE CADA ANO NA CAMADA INFERIOR DO SOLO

Os armazenamentos de água nas camadas superior e inferior do solo ocorrem com diferença de fase de aproximadamente 4 meses, ou seja, para um determinado ano o

armazenamento mínimo na camada inferior do solo ocorre 4 meses após o mínimo ter ocorrido na camada superior. De forma geral, a variação anual do armazenamento na camada superior do solo é caracterizada por um mínimo no final do inverno e início da primavera (agosto e setembro), que é o final da estação seca, e um máximo no verão (dezembro a fevereiro). Enquanto que a variação do armazenamento na camada inferior do solo é caracterizada por um mínimo no final da primavera e início do verão (entre novembro e janeiro) e um máximo no final do outono e início do inverno (maio e junho).

A figura 4.12 ilustra a variabilidade do escoamento superficial e de base (inclui o escoamento subsuperficial) simulados pelo modelo 3R para o período 1987-2001, onde a média do escoamento de base simulado é de 20 mm mês^{-1} .

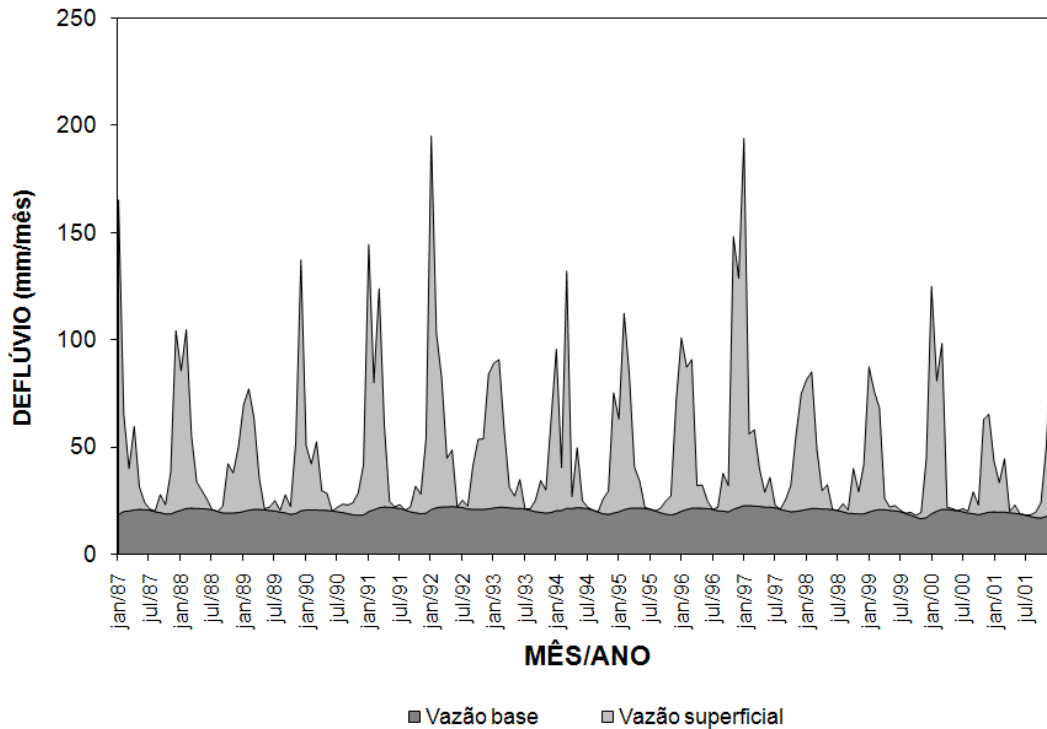


FIGURA 4.12 – SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DE BASE PRODUZIDOS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA DE PLUVIÔMETROS EM FURNAS

O efeito da modelagem de propagação de cheias do modelo 3R está ilustrado na figura 4.13 que compara as séries mensais da soma dos escoamentos superficial e de base simulados sem propagação (somente o balanço hídrico mensal do solo) e com propagação.

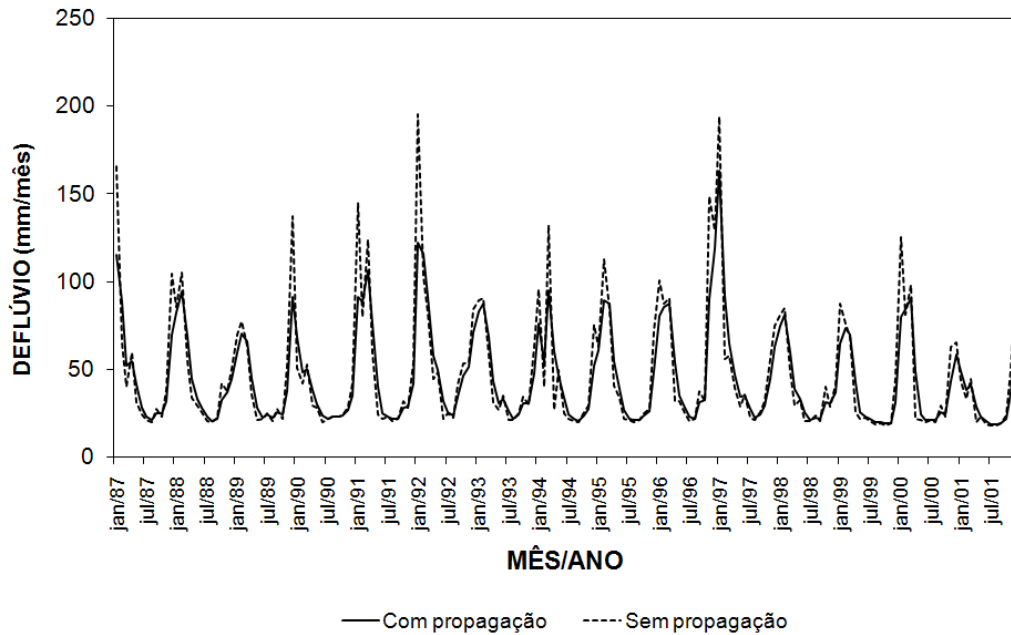


FIGURA 4.13 – COMPARAÇÃO DA SOMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DE BASE SIMULADOS SEM PROPAGAÇÃO E COM PROPAGAÇÃO DE CHEIAS PARA 1987-2001 EM FURNAS

Nota-se que mesmo com resolução mensal é necessária a adoção de um modelo de propagação de cheias, conforme a figura 4.13 ilustra através da superestimativa das vazões de pico quando se exclui a propagação de cheias. A figura 4.14 mostra com mais detalhe o efeito da propagação de cheias, ilustrando somente o período janeiro/1991-dezembro/1993, centrado em 1992 que foi o ano com a maior média da vazão anual durante o período de calibração.

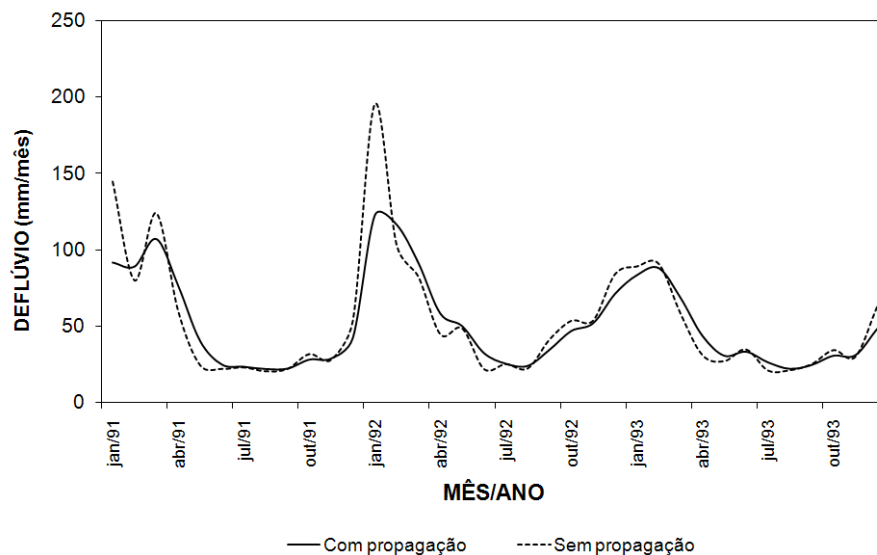


FIGURA 4.14 – COMPARAÇÃO DA SOMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DE BASE SIMULADOS SEM PROPAGAÇÃO E COM PROPAGAÇÃO DE CHEIAS PARA 1991-1993 EM FURNAS

As figuras 4.15 e 4.16 ilustram o detalhamento da comparação entre as vazões observada e modelada para o período úmido 1991-1993 e o período seco 2000-2001,

respectivamente; 2001 foi o ano com a menor chuva média anual da série 1987-2001.

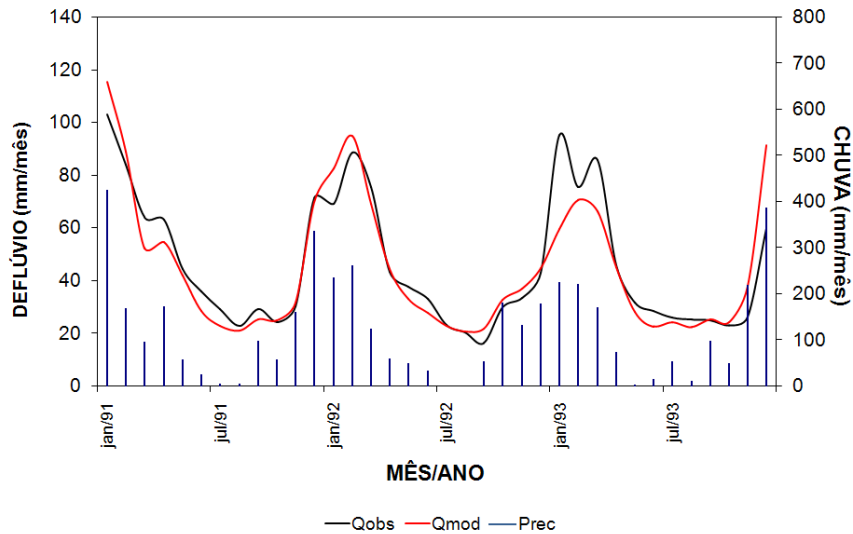


FIGURA 4.15 – COMPARAÇÃO ENTRE AS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS PARA O PERÍODO ÚMIDO (1991-1993) EM FURNAS

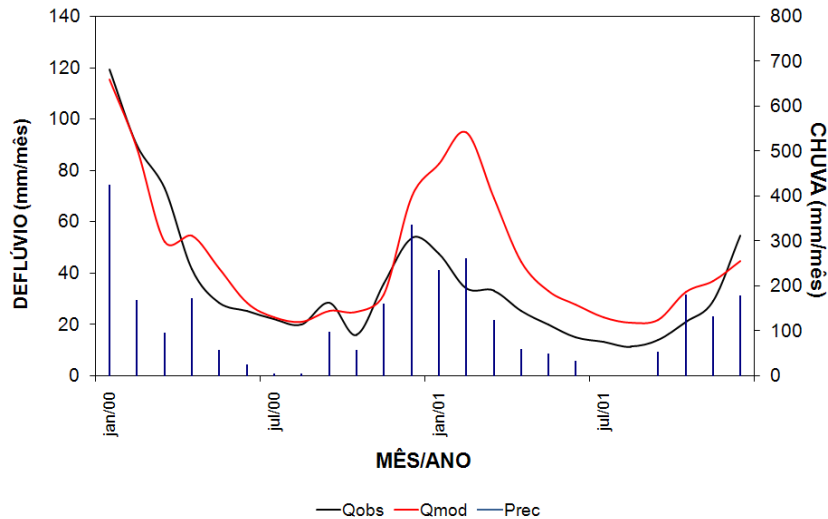


FIGURA 4.16 – COMPARAÇÃO ENTRE AS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS PARA O PERÍODO SECO (2000-2001) EM FURNAS

Em conclusão, o modelo 3R aplicado para Furnas no período 1987-2001 usando como dado de entrada a chuva média na bacia estimada com pluviômetros, simulou adequadamente a fase e pico dos hidrogramas tanto para os anos úmidos quanto para os anos secos.

4.1.5 Análise das previsões

Essa seção aborda inicialmente a análise das previsões de vazão, usando como dado

de entrada a chuva prevista e o modelo hidrológico 3R, com os parâmetros calibrados a partir da série de chuva média na bacia a partir dos dados de três pluviômetros. Na sequência, apresenta-se a análise conjunta das previsões de chuva e vazão condicionadas aos casos mais significativos do período chuvoso compreendido entre setembro e março nas usinas de Furnas e Emborcação. Definiram-se os casos significativos como sendo aqueles em que a variável (chuva ou vazão) teve magnitude inferior ao do percentil de 20%, ou então teve magnitude superior ao percentil de 80%; dessa forma, busca-se analisar as taxas de acerto das previsões para os eventos mais secos e mais úmidos da estação chuvosa.

4.1.5.1 Análise da previsão de vazão

A previsão de vazão foi desenvolvida com o modelo 3R calibrado com os parâmetros obtidos com a chuva observada, sendo rodado com os dados da série de chuva observada até o mês “i”, quando se inicia a previsão. Em seguida, o modelo 3R lê os dados da chuva mensal prevista do EUROBRISA para um horizonte de previsão de 3 meses; assim se produz a vazão prevista para os meses “i+1”, “i+2” e “i+3”.

Considerou-se o erro da previsão como a diferença entre a vazão prevista e a observada. A tabela 4.4 lista a média e o desvio padrão dos erros da previsão de vazão, bem como a correlação entre vazão prevista e observada para os horizontes de previsão de um, dois e três meses. Os valores apresentados são médias aritméticas considerando-se todos os meses do ano.

TABELA 4.4 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DAS VAZÕES PREVISTAS COM A CHUVA DO EUROBRISA PARA OS HORIZONTES DE PREVISÃO DE 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES EM FURNAS

Estatística	Q_{prev} (1 mês)	Q_{prev} (2 meses)	Q_{prev} (3 meses)
Média da vazão observada		44,6 mm mês ⁻¹	
Desvio padrão da vazão observada		29,4 mm mês ⁻¹	
Média da vazão prevista	42,4 mm mês ⁻¹	43,1 mm mês ⁻¹	45,2 mm mês ⁻¹
Desvio padrão da vazão prevista	18,8 mm mês ⁻¹	20,4 mm mês ⁻¹	24,1 mm mês ⁻¹
Média do erro	-2,1 mm mês ⁻¹	-1,0 mm mês ⁻¹	1,6 mm mês ⁻¹
Desvio padrão do erro	19,3 mm mês ⁻¹	19,4 mm mês ⁻¹	20,0 mm mês ⁻¹
Correlação PREV-OBS	0,76	0,76	0,74

A análise dos dados listados na tabela 4.4 indica que:

- O erro médio da previsão com horizonte de um mês corresponde a 5% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 63% do desvio padrão da vazão observada;
- O erro médio da previsão com horizonte de dois meses corresponde a 2% da

vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 69% do desvio padrão da vazão observada;

- O erro médio da previsão com horizonte de três meses corresponde a 4% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 82% do desvio padrão da vazão observada;
- O desvio padrão do erro aumenta com o horizonte de previsão;
- A correlação entre a vazão prevista e observada diminui com o horizonte de previsão, sendo 0,76 para um mês, 0,76 para dois meses e 0,74 para três meses.

As figuras 4.17, 4.18 e 4.19 ilustram as comparações entre os hidrogramas previstos e observados para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses, e 3 meses, respectivamente.

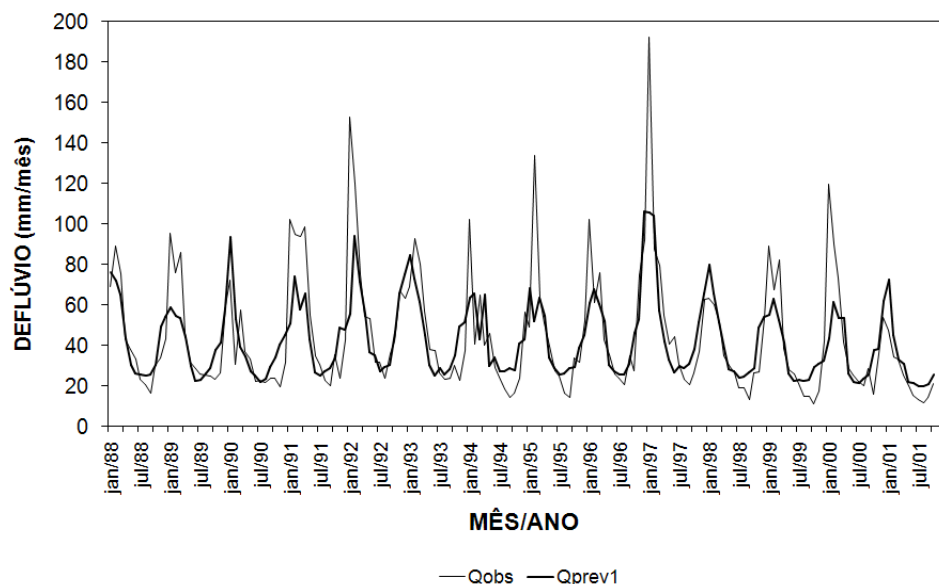


FIGURA 4.17 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM FURNAS

A vazão prevista representa adequadamente as recessões e as subidas dos hidrogramas. Os picos de 1988, 1993, 1996 e 1998 foram previstos adequadamente. Os picos tendem a ser subestimados, conforme se observa na figura 4.17 para os anos de 1989, 1991, 1992, 1994, 1995, 1997, 1999 e 2000, ou seja em oito dos catorze picos da série 1987-2001. Alguns picos foram superestimados (1990, 1998 e 2001) que foram os anos mais secos da série.

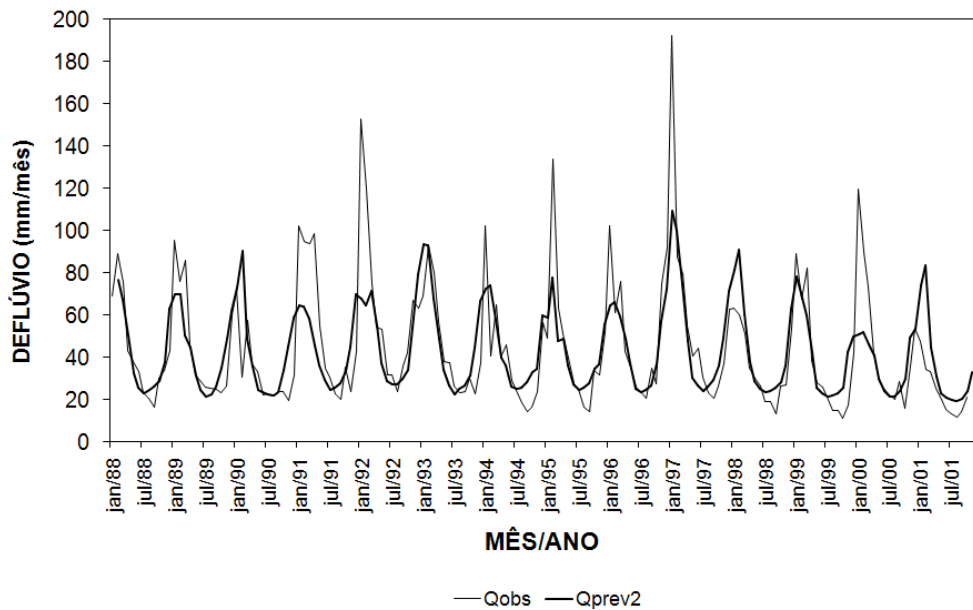


FIGURA 4.18 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM FURNAS

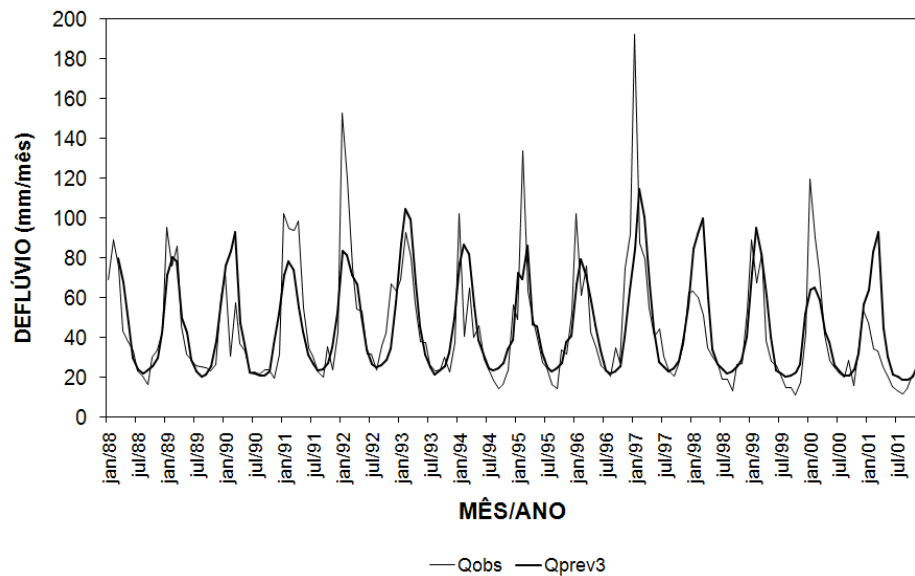


FIGURA 4.19 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM FURNAS

Para os picos das vazões previstas com 2 e 3 meses de antecedência, verificou-se que:

- Os picos de 1988, 1989, 1993, 1994, 1996 e 1999 foram previstos adequadamente.
- Os picos foram subestimados em: 1991, 1992, 1995, 1997 e 2000, ou seja em cinco dos catorze picos da série 1987-2001.

- O pico foi superestimado em 1990, 1998 e 2001.

É necessário comparar os resultados de vazões previstas com as vazões modeladas a partir da chuva perfeita. A chuva perfeita é a consideração de que a chuva prevista foi igual à chuva ocorrida, e a simulação de vazões a partir dessa chuva permite analisar a resposta das previsões de chuva nas previsões de vazões sem levar-se em consideração os erros do modelo com relação às vazões observadas.

A tabela 4.5 apresenta as estatísticas entre a vazão modelada (obtida a partir da chuva perfeita) e a vazão prevista (obtida a partir da previsão de chuva). As figuras 4.20, 4.21 e 4.22 mostram os gráficos de comparação entre vazões modeladas e previstas para os três horizontes de previsão considerados.

TABELA 4.5 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DAS VAZÕES PREVISTAS COM AS VAZÕES MODELADAS PARA OS HORIZONTES DE PREVISÃO DE 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES EM FURNAS

Estatística	Q_{prev} (1 mês)	Q_{prev} (2 meses)	Q_{prev} (3 meses)
Média da vazão modelada		44,9 mm mês ⁻¹	
Desvio padrão da vazão modelada		26,8 mm mês ⁻¹	
Média da vazão prevista	42,4 mm mês ⁻¹	43,1 mm mês ⁻¹	45,2 mm mês ⁻¹
Desvio padrão da vazão prevista	18,8 mm mês ⁻¹	20,4 mm mês ⁻¹	24,1 mm mês ⁻¹
Média do erro	-2,5 mm mês ⁻¹	-1,3 mm mês ⁻¹	1,4 mm mês ⁻¹
Desvio padrão do erro	14,2 mm mês ⁻¹	15,7 mm mês ⁻¹	16,6 mm mês ⁻¹
Correlação PREV-OBS	0,86	0,81	0,80

Os coeficientes de correlação entre as vazões modeladas e previstas (tabela 4.5) foram maiores que os coeficientes de correlação entre vazões observadas e previstas (tabela 4.4). Isso já era esperado, porque quando se comparam as vazões modeladas com as previstas, exclui-se o desempenho do modelo 3R em reproduzir as vazões observadas, e por isso a correlação é maior. Esse é o melhor modo de analisar as vazões previstas através da previsão sazonal de chuvas, pois assim é avaliada a qualidade dos dados de entrada de previsão de chuva em reproduzir vazões, característica que permanece inalterada se o modelo usado para simulação for modificado ou substituído.

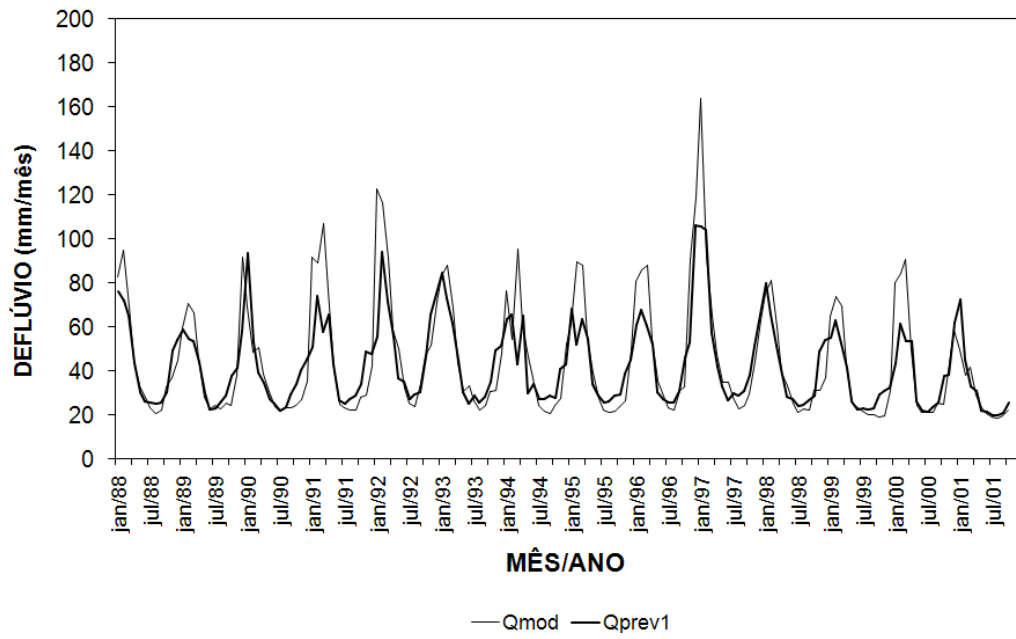


FIGURA 4.20 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM FURNAS

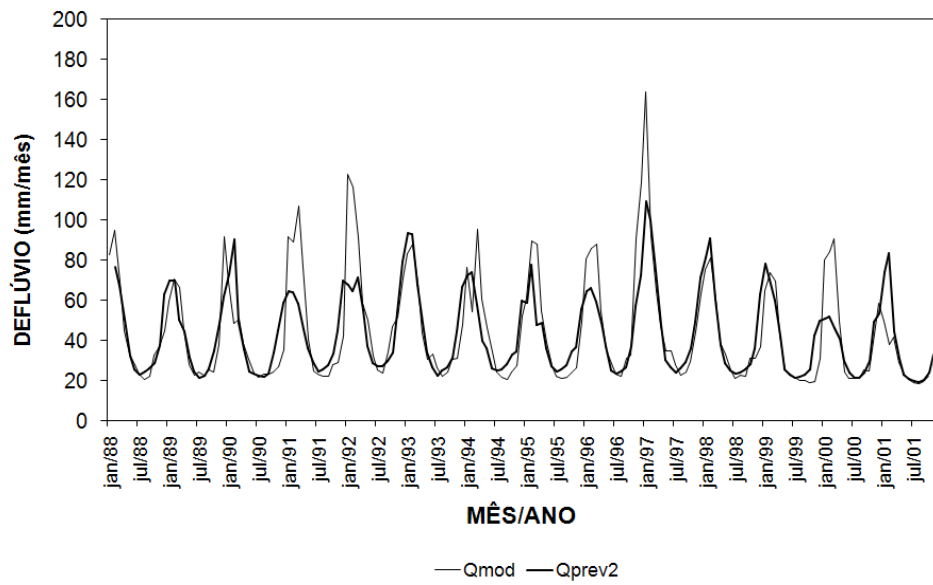


FIGURA 4.21 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM FURNAS

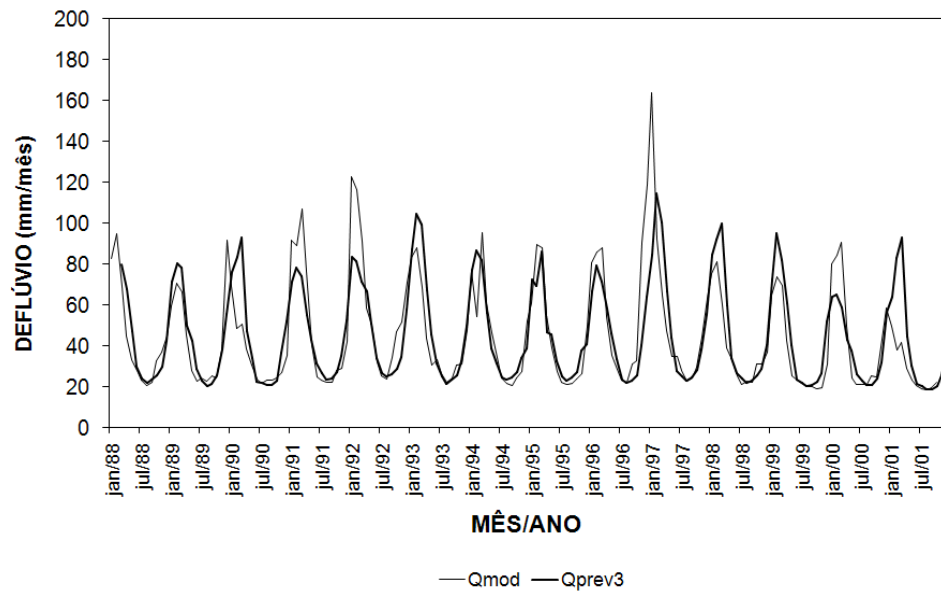


FIGURA 4.22 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM FURNAS

4.1.5.2 Análise das previsões de chuva e vazão condicionada aos extremos da estação chuvosa

Para o planejamento da operação dos reservatórios de usinas integrantes do SIN, é interessante avaliar com mais profundidade o resultado das previsões de vazões durante o período chuvoso, pois é nesse período que pode haver maior geração de energia, enquanto que no período seco a geração através de matriz hidrelétrica é menor.

Conforme observado na seção 4.1.1.1, a usina de Furnas possui sazonalidade bem definida. Desse modo, é possível determinar o período chuvoso para essa bacia como o período compreendido entre os meses de setembro e março.

Para avaliar a previsão de chuvas, pode-se construir um gráfico de correlação entre anomalias previstas e anomalias observadas que obedece aos seguintes condicionantes:

- considerando-se somente os meses entre setembro e março, são calculadas as chuvas para os percentis de 20% e 80% (C_{20} e C_{80} , respectivamente);
- são retirados das séries de dados os meses em que a chuva observada esteve entre C_{20} e C_{80} . Desse modo, os dados são filtrados para os casos em que houve ocorrência de extremos (chuvas mínimas menores que C_{20} e chuvas máximas maiores que C_{80});
- são calculadas as anomalias observadas para os meses filtrados considerando-se a chuva média climatológica observada entre 1987 e 2001;

- as anomalias observadas são comparadas com as anomalias previstas, e constrói-se um gráfico de correlação.

A figura 4.23 apresenta o gráfico de correlação entre anomalias previstas e observadas para a bacia incremental de Furnas. A partir desse gráfico, são calculadas as taxas de acerto e erro.

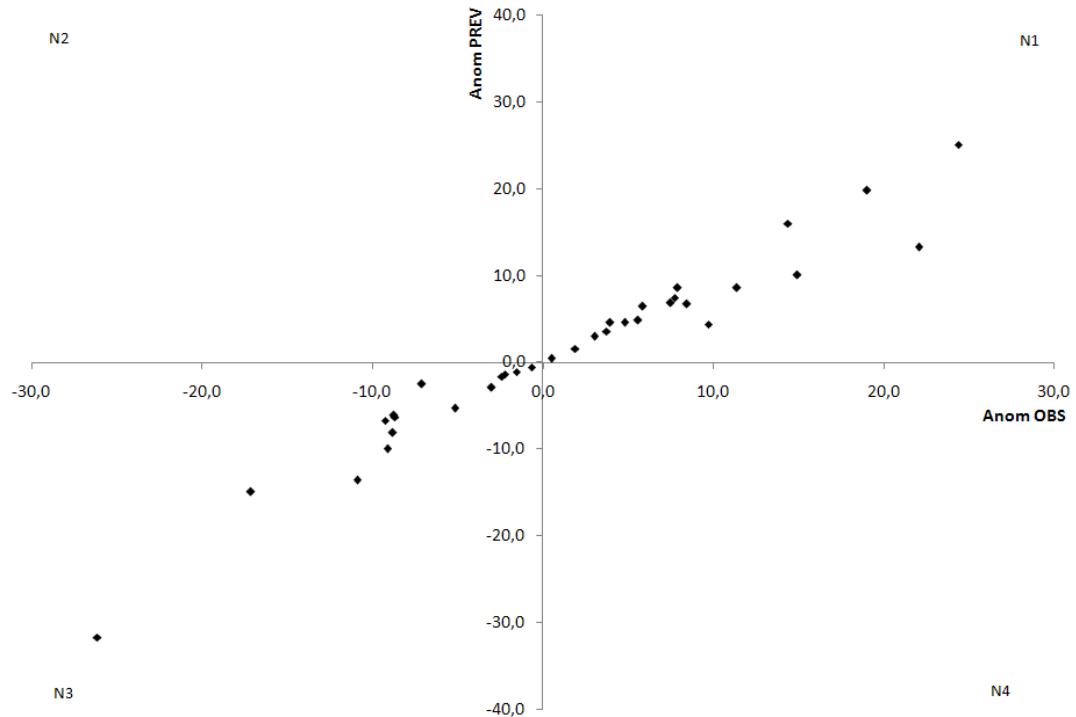


FIGURA 4.23 – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIAS OBSERVADAS E PREVISTAS DE CHUVA EM FURNAS

A taxa de acerto é calculada através da contagem de pontos existentes nos quadrantes N1, N2, N3 e N4. Os pontos existentes nos quadrantes N1 e N3 indicam que a anomalia prevista teve mesmo sinal que a anomalia observada e, portanto, houve acerto na previsão. A soma do número de pontos nos quadrantes N1 e N3 dividida pelo número total de pontos existentes no gráfico resulta na taxa de acerto (equação 51). Os pontos existentes nos quadrantes N2 e N4 indicam que a anomalia prevista teve sinal oposto à anomalia observada (quando se previu chuva – anomalia positiva – não houve ocorrência do evento – anomalia negativa, e vice-versa). Desse modo, a taxa de erro é calculada através da divisão entre a soma do número de pontos existentes nos quadrantes N2 e N4 e o número total de pontos existentes no gráfico (equação 52).

$$taxa_acerto = \frac{N1 + N3}{N1 + N2 + N3 + N4} \quad (51)$$

$$taxa_erro = \frac{N2 + N4}{N1 + N2 + N3 + N4} \quad (52)$$

Nas equações (51) e (52), “ N_i ” representa o número de pontos existentes no quadrante i .

A tabela 4.6 apresenta os valores necessários para calcular a taxa de acerto e a taxa de erro para a bacia incremental de Furnas.

TABELA 4.6 – NÚMERO DE CASOS EXISTENTES NOS QUADRANTES N1 A N4 NO GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DE PREVISÃO DE CHUVA PARA FURNAS

Caso	Número de casos	Observação
$Anom_{obs}>0 \cap Anom_{prev}>0$	19	Quadrante N1
$Anom_{obs}<0 \cap Anom_{prev}>0$	0	Quadrante N2
$Anom_{obs}<0 \cap Anom_{prev}<0$	15	Quadrante N3
$Anom_{obs}>0 \cap Anom_{prev}<0$	0	Quadrante N4

Através das equações (51) e (52) e da tabela 4.6, as taxas de acerto e erro da previsão de chuva calculadas para a bacia de Furnas, obedecendo-se às restrições apresentadas, são:

Taxa de acerto: 100%

Taxa de erro: 0%

Para avaliar as vazões previstas para o horizonte de 1 mês, são utilizados os mesmos condicionantes impostos para a análise da previsão de chuvas. Desse modo, através da frequência acumulada das vazões observadas, calculam-se as vazões V_{20} e V_{80} (vazões correspondentes aos percentis de 20% e 80%, respectivamente) para o período chuvoso, retiram-se os meses das séries de dados referentes às vazões observadas que se encontraram entre V_{20} e V_{80} , calculam-se as anomalias observadas e previstas de vazão e constrói-se um gráfico de correlação, o qual é apresentado na figura 4.24.

A tabela 4.7 apresenta a contagem de pontos em cada quadrante do gráfico de correlação, necessária para calcular a taxa de acerto e a taxa de erro na previsão de vazão com horizonte de um mês para a bacia incremental de Furnas.

TABELA 4.7 – NÚMERO DE CASOS EXISTENTES NOS QUADRANTES N1 A N4 NO GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DE PREVISÃO DE VAZÃO PARA FURNAS

Caso	Número de casos	Observação
$Anom_{obs}>0 \cap Anom_{prev}>0$	15	Quadrante N1
$Anom_{obs}<0 \cap Anom_{prev}>0$	7	Quadrante N2
$Anom_{obs}<0 \cap Anom_{prev}<0$	12	Quadrante N3
$Anom_{obs}>0 \cap Anom_{prev}<0$	11	Quadrante N4

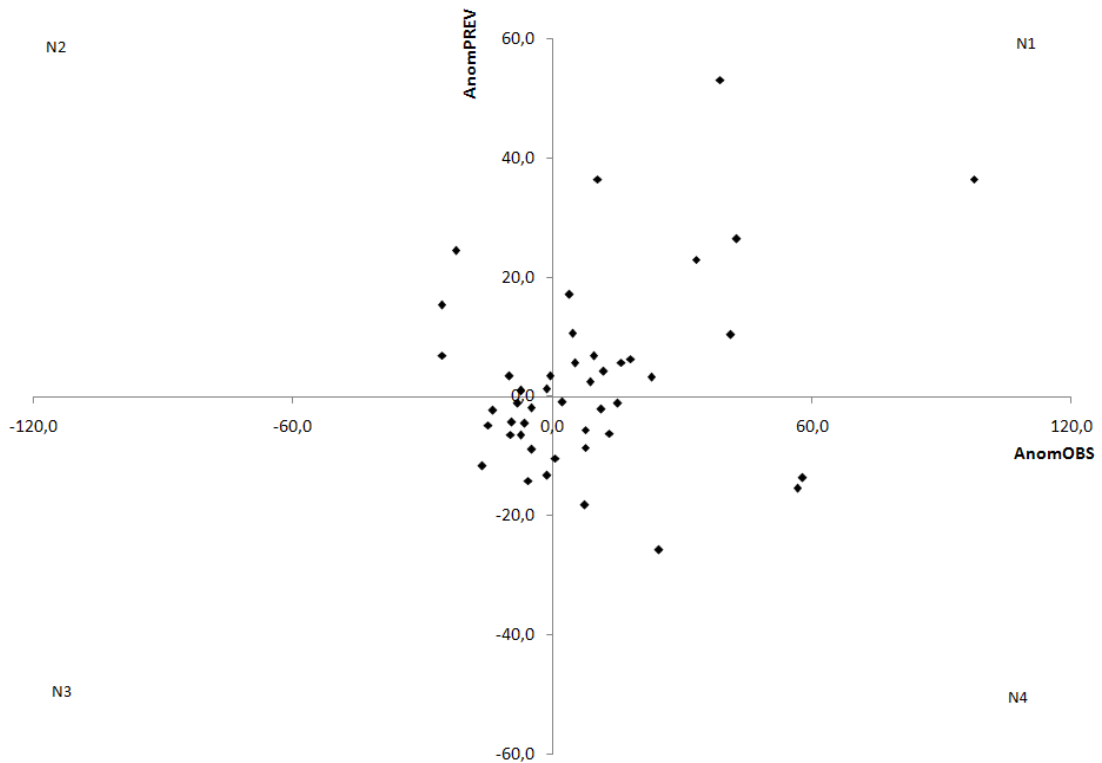


FIGURA 4.24 – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIAS OBSERVADAS E PREVISTAS DE VAZÃO EM FURNAS

Utilizando-se as equações (51) e (52), obtém-se como resultado que as taxas de acerto e erro na previsão de vazões para horizonte de um mês são iguais a:

Taxa de acerto: 60%

Taxa de erro: 40%

4.2 BACIA DO RIO PARANAÍBA – USINA DE EMBORCAÇÃO

4.2.1 Variabilidade espaço-temporal das vazões naturais

A variabilidade espacial foi verificada para o aproveitamento de Emborcação para o período 1942 – 2007, com o objetivo de identificar-se o comportamento do regime anual de vazões e da série histórica para a bacia incremental correspondente.

4.2.1.1 Variabilidade sazonal

A figura 4.25 ilustra o ciclo anual dos deflúvios no Rio Paranaíba, em Emborcação, incluindo uma banda de variação de um desvio padrão.

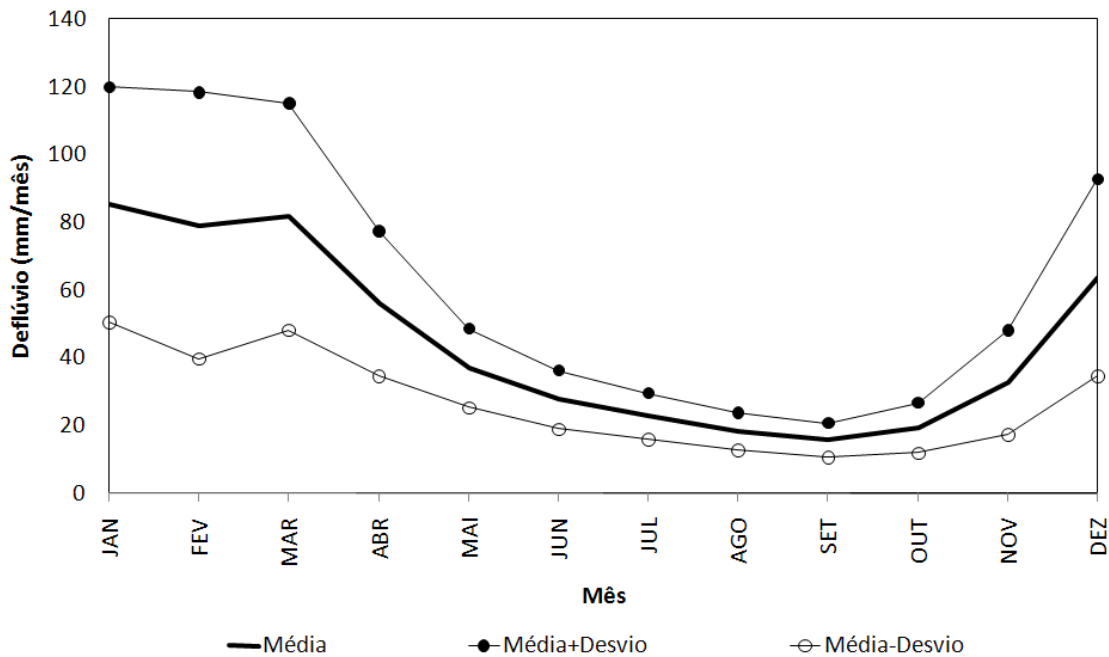


FIGURA 4.25 – CICLO ANUAL DOS DEFLÚVIOS PARA O RIO PARANAÍBA EM EMBORCAÇÃO

O deflúvio médio de longo termo no Rio Paranaíba, em Emborcação, é 539 mm/ano e seu desvio padrão é 149 mm/ano para o período 1942-2007. O período selecionado para a verificação do índice de acerto das previsões mensais de vazão foi 1987-2001, cuja média e desvio padrão são 457 mm/ano e 144 mm/ano, respectivamente.

As vazões para esta bacia variam com sazonalidade definida. O período úmido corresponde aos meses de novembro a março e o período de recessão ocorre de julho a setembro. O máximo do ciclo anual ocorre em janeiro, com aproximadamente 85 mm/mês, e o mínimo em setembro, com 16 mm/mês. Os meses com maior variabilidade são janeiro e março, e o mês com menor variabilidade é setembro.

Para calcular o índice de armazenamento do reservatório, tem-se que seu volume útil é igual a 13056 hm³ (tabela 3.8) e que a MLT corresponde a 43.10⁶ m³/dia. Calculando a razão entre esses dois valores, obtém-se que o índice de armazenamento para Emborcação é de aproximadamente 305 dias.

Como a sazonalidade é definida, pode-se calcular a capacidade de regularização sazonal deste reservatório, que resultou em valor igual a 1,9.

4.2.1.2 Variabilidade interanual

A figura 4.26 ilustra a série dos deflúvios anuais no Rio Paranaíba, em

Emborcação, para o período de 1942 a 2004. O período de verificação das previsões de vazão, 1987-2001, está destacado com a linha mais grossa, com círculos.

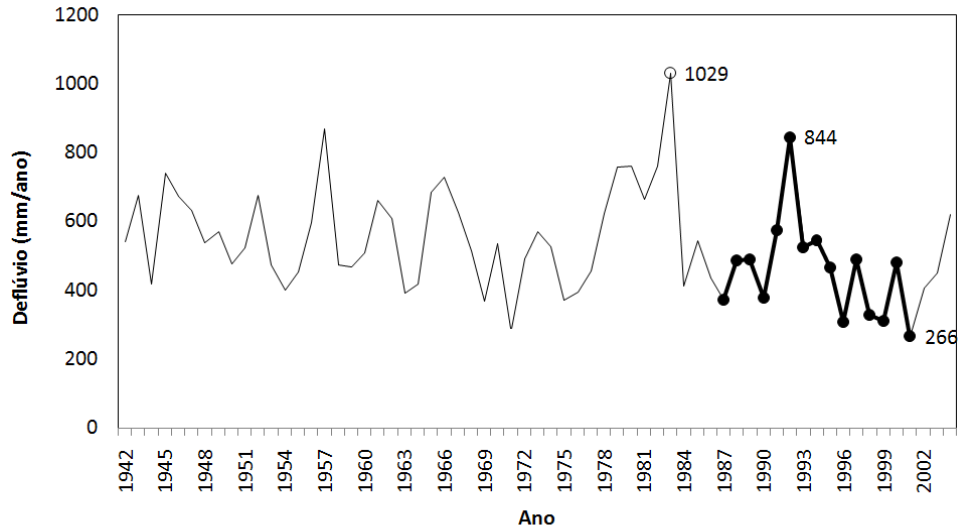


FIGURA 4.26 – VARIABILIDADE INTERANUAL DOS DEFLÚVIOS EM MM/ANO PARA O RIO PARANAÍBA EM EMBORCAÇÃO

O deflúvio anual máximo da série ocorreu em 1983, com 1029 mm/ano, e o mínimo foi registrado em 2001, com 266 mm/ano. O período de verificação selecionado apresentou o máximo anual em 1992, com 844 mm/ano, e o mínimo em 2001 com 266 mm/ano. O período de verificação apresenta eventos secos e úmidos próximos aos mínimos e máximos da série histórica.

A figura 4.27 mostra a variabilidade do deflúvio em mm/mês para o período de verificação 1987 - 2001. Observa-se que a partir do ano de 1996, as vazões mínimas do hidrograma diminuem com relação ao período anterior da série. Isso demonstra que houve uma diminuição na vazão de base na bacia, que pode ter ocorrido devido ao maior uso das vazões através de ações antrópicas. Outra possibilidade é a de que os dados de vazão apresentem erros a partir dessa data e que são refletidos na diminuição da vazão de base.

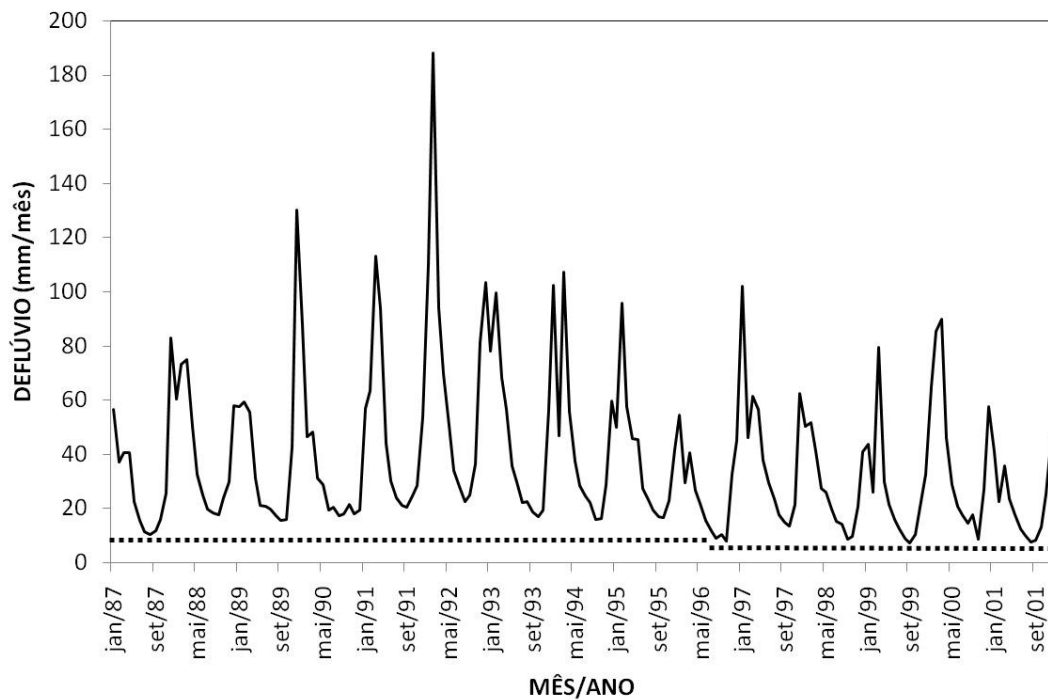


FIGURA 4.27 – VARIABILIDADE INTERANUAL DOS DEFLÚVIOS EM MM/MÊS PARA O RIO PARANAÍBA EM EMBORÇÃO NO PERÍODO 1987 – 2001

4.2.2 Análise da previsão de chuvas

O gráfico da figura 4.28 mostra a chuva prevista, calculada a partir dos dados de chuva observada, e a chuva observada, ambas em resolução trimestral. A chuva observada possui valores que variaram entre 0 e 400 mm/mês, enquanto que a chuva prevista variou entre valores de 0 e 300 mm/mês. A chuva observada média foi de 115 mm/mês, e a chuva prevista média foi de 116 mm/mês.

A comparação dos dados trimestrais de chuva prevista com os dados trimestrais de chuva observada nos pluviômetros resultou em erro médio (média das diferenças entre chuva prevista e chuva observada) igual a 0,8 mm/mês e desvio padrão de 36,0 mm/mês (tabela 4.8). Para os anos de 1988, 1992, 1997, 2000 e 2001, a chuva observada foi maior que a chuva prevista, e somente para o ano de 1996 a chuva observada foi menor que a prevista. Os outros picos da série foram representados adequadamente.

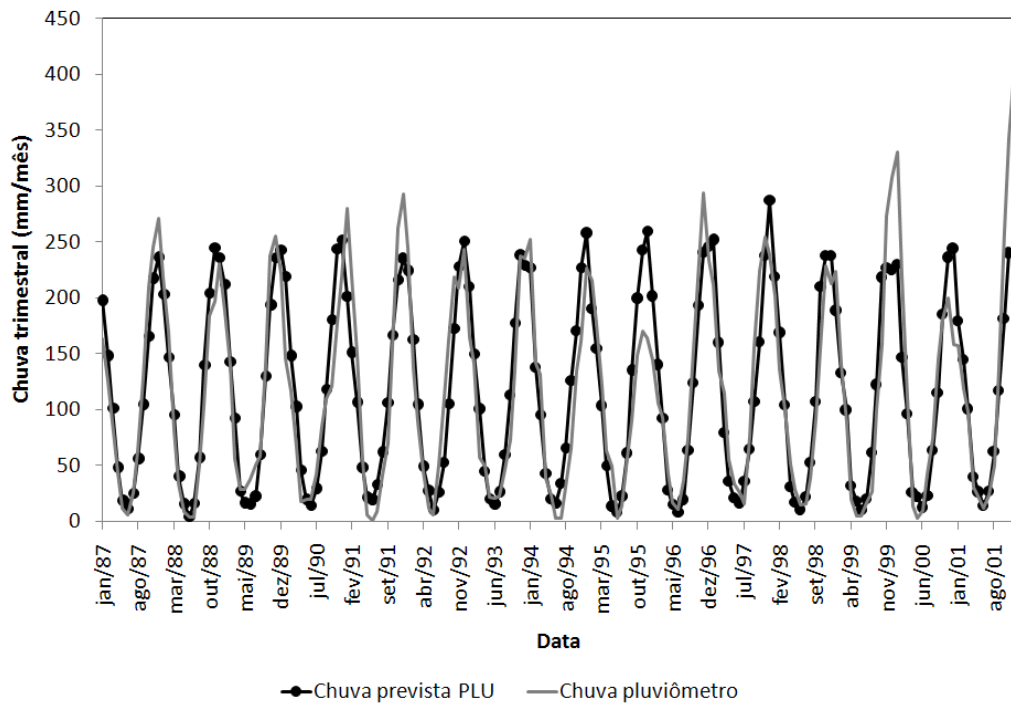


FIGURA 4.28 – VALORES DE CHUVA OBSERVADA E CHUVA PREVISTA EM RESOLUÇÃO TRIMESTRAL PARA O APROVEITAMENTO DE EMBORCAÇÃO (PERÍODO 1987 – 2001)

TABELA 4.8 – ERRO MÉDIO, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE CHUVA OBSERVADA E CHUVA PREVISTA PARA O APROVEITAMENTO DE EMBORCAÇÃO

Aproveitamento hidrelétrico	Emborcação
Erro médio (mm/mês)	0,8
Desvio padrão (mm/mês)	36,0
Coefficiente de correlação	0,91

A figura 4.29 mostra a frequência acumulada da chuva prevista, calculada a partir da média e desvio padrão da chuva observada nos pluviômetros, e da chuva observada nos pluviômetros. Observa-se que nos percentis abaixo de 90%, a chuva prevista superestima a chuva observada em alguns casos, mas de maneira geral os dois tipos de dados de chuva apresentaram frequências acumuladas semelhantes, como por exemplo nos percentis abaixo de 40%. Para os percentis acima de 90%, que correspondem aos eventos chuvosos extremos, a chuva prevista subestima a chuva do pluviômetro.

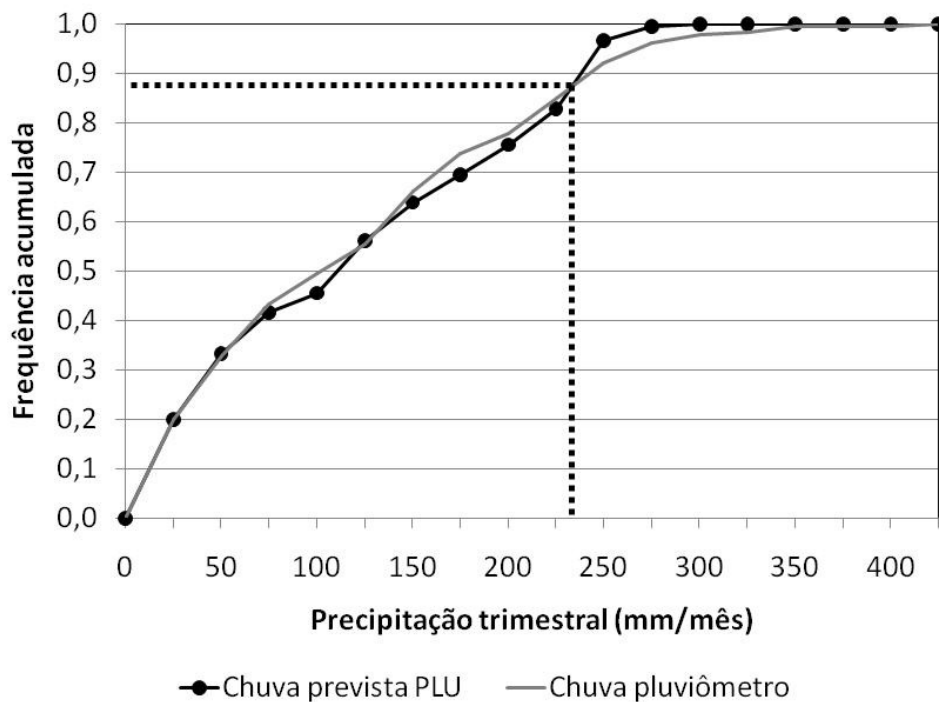


FIGURA 4.29 – FREQUÊNCIA ACUMULADA DAS PRECIPITAÇÕES OBSERVADA E PREVISTA EM RESOLUÇÃO TRIMESTRAL EM EMBORCAÇÃO

4.2.3 Análise da consistência conjunta dos dados mensais

A Figura 4.30 ilustra o comportamento do armazenamento no solo, obtido através do modelo “Balmes” para três diferentes coeficientes multiplicadores da evapotranspiração potencial.

Observa-se que os dados climatológicos de evapotranspiração potencial requerem que o armazenamento da água no solo seja superior a 2000 mm, que é um valor alto. Então foi aplicado um coeficiente de 1,2 para majorar os valores climatológicos de evapotranspiração potencial, o que produziu um armazenamento da ordem de 1000 mm e uma variabilidade da ordem de 800 mm. Aumentando ainda mais o coeficiente para 1,4, o armazenamento cai para aproximadamente 500 mm, valor em geral considerado baixo para armazenamento de água no solo. A conclusão desta análise é que a evapotranspiração potencial climatológica foi subestimada e deve ser majorada em 20%, pois este coeficiente produz os valores médios de armazenamento mais coerentes no balanço hídrico.

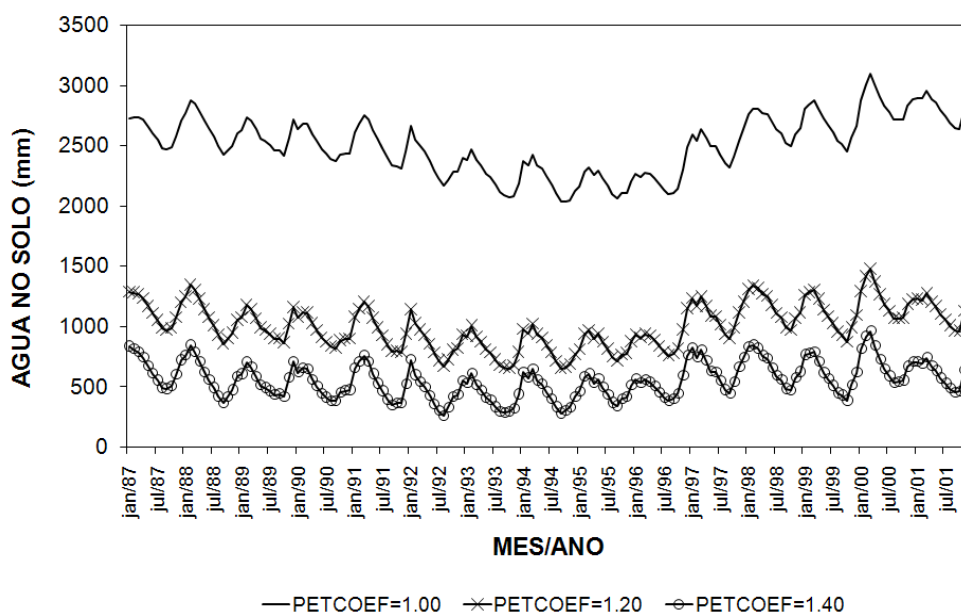


FIGURA 4.30 – VARIACÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA A CHUVA ESTIMADA COM PLUVIÔMETROS EM EMBORCAÇÃO, APLICANDO-SE TRÊS DIFERENTES COEFICIENTES PARA A CORREÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (1,0; 1,2 E 1,4)

A figura 4.31 ilustra o armazenamento no solo obtido para as séries de chuva observada nos pluviômetros e chuva prevista. Os valores de água no solo obtidos das duas séries de chuva apresentaram uma leve queda no período central, entre os anos de 1991 e 1997, que pode indicar inconsistência entre os dados de chuva, vazão e evapotranspiração. Entretanto, a ordem de grandeza da variação da água no solo é condizente com o esperado para dados consistentes entre si.

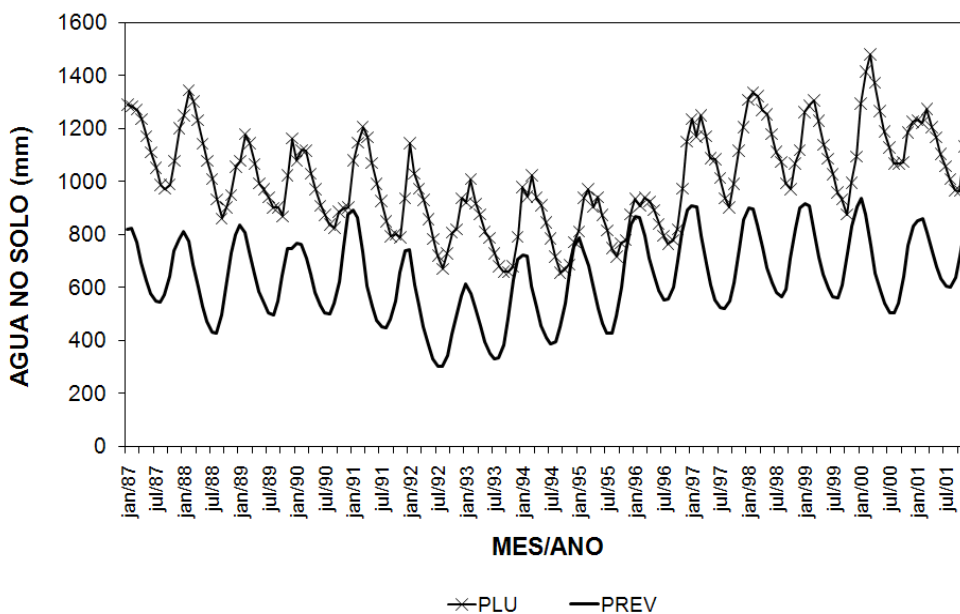


FIGURA 4.31 – COMPARAÇÃO DA VARIACÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS E A CHUVA PREVISTA EM EMBORCAÇÃO

4.2.4 Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico 3R

Nesse caso a calibração usou como dado de entrada a série da chuva média na bacia estimada a partir da média aritmética dos registros de pluviômetros. Os parâmetros calibrados são apresentados na tabela 4.9.

TABELA 4.9 – PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R USANDO-SE A CHUVA DOS PLUVIÔMETROS COMO DADO DE ENTRADA PARA EMBORCAÇÃO

Parâmetro	Descrição	Valor
X_1^o	Capacidade da camada superior do solo	595 mm
X_2^o	Capacidade da camada inferior do solo	1584 mm
m_1	Expoente da função de escoamento superficial	1,140
C_1	Taxa de recessão do escoamento sub-superficial	0,00003 mês ⁻¹
m_2	Expoente da função de percolação	1,8
m_3	Expoente da função de transpiração	1,0
C_2	Taxa de recessão da camada inferior do solo	0,0163 mês ⁻¹
C_3	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	119,71
μ	Define fração de recarga do aquífero	0,0865
β	Taxa de recessão da propagação	1,907 mês ⁻¹
m	Expoente da função de propagação	1,0
n	Número de reservatórios conceituais na cascata	2

Nota-se que o valor calibrado do parâmetro $C_1=0,00003$ mês⁻¹ indica que o escoamento sub-superficial foi considerado nulo. O coeficiente $C_2=0,0163$ mês⁻¹ corresponde à taxa de recessão do escoamento originado da camada inferior do solo (escoamento de base e recarga do aquífero), cuja escala de tempo é de 61 meses (quase 5 anos). Se a camada inferior do solo estiver saturada, então a soma da vazão de base e recarga corresponde à $GW=C_2X_2$, ou seja, $GW=0,0163*1584=25,8$ mm mês⁻¹.

A tabela 4.10 lista as médias de longo termo (1987-2001) dos fluxos observados e simulados. A precipitação e evapotranspiração potencial são dados de entrada para o modelo 3R, a vazão observada é usada para estimar os erros da simulação. A vazão simulada corresponde à saída do modelo 3R, sendo composta pelas simulações do escoamento superficial e pelo escoamento de base (que incluiu o escoamento subsuperficial).

TABELA 4.10 – MÉDIAS DOS FLUXOS OBSERVADOS E SIMULADOS ANUAIS PARA A CALIBRAÇÃO COM CHUVA ESTIMADA POR PLUVIÔMETROS PARA O PERÍODO 1987-2001 EM EMBORCAÇÃO

Fluxo	Observado (mm ano ⁻¹)	Simulado (mm ano ⁻¹)
Chuva	1373	
Evapotranspiração Potencial	1221	
Evapotranspiração Real		885
Vazão	457	458
Escoamento Base		191
Escoamento Superficial		294
Recarga do Aquífero		16

Na tabela 4.10 se observa que o coeficiente de escoamento da bacia (razão entre vazão e chuva) de Emborcação é 0,33, ou seja, em média 33% da chuva escoo no rio; a evapotranspiração real simulada corresponde a 72% da evapotranspiração potencial. O modelo 3R estimou que a vazão de base e o escoamento superficial corresponderam a 42% e 64% da vazão no rio, respectivamente.

Os resultados da calibração para Emborcação produziram erros médios inferiores a 1% e a correlação entre as vazões observadas e simuladas foi $\rho=0,84$. A figura 4.32 ilustra a comparação entre as vazões observada e modelada para o período 1987-2001, com a chuva média na bacia estimada a partir dos pluviômetros.

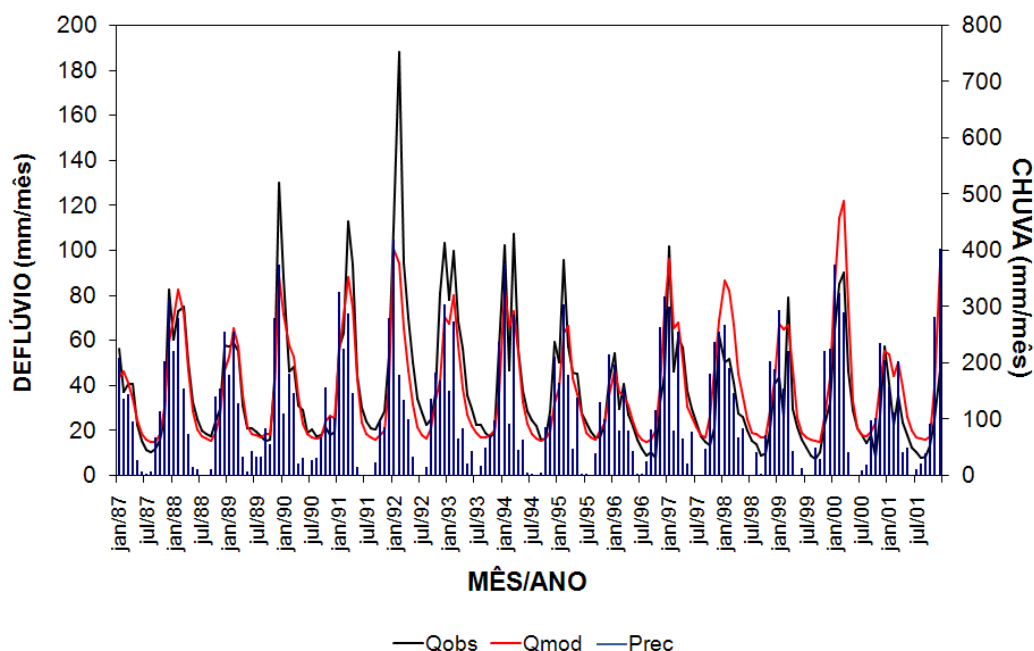


FIGURA 4.32– COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADA E OBSERVADA PRODUZIDAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA DE PLUVIÔMETROS EM EMBORCAÇÃO

O modelo simulou adequadamente a fase e o pico dos hidrogramas. Os picos das

vazões simuladas foram subestimados nos verões de 1990, 1991, 1992, 1993 e 1995 e foi superestimado no verão de 2000.

A Figura 4.33 mostra os armazenamentos acumulados nas camadas superior e inferior do solo. Os valores dos máximos e mínimos do armazenamento nas camadas superior e inferior do solo variam de ano para ano, conforme ilustram as figuras 4.34 e 4.35 que indicam o armazenamento máximo e mínimo de cada ano para as camadas superior e inferior do solo, respectivamente.

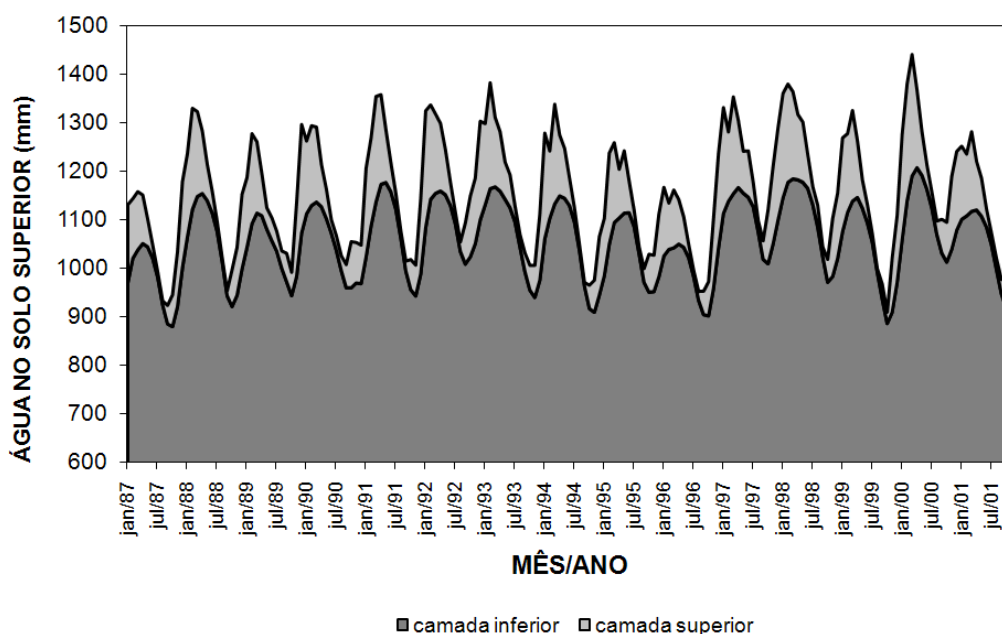


FIGURA 4.33 – VARIABILIDADE DO ARMAZENAMENTO NAS CAMADAS INFERIOR E SUPERIOR DO SOLO SIMULADAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA DE PLUVIÔMETROS EM EMBORCAÇÃO

mês	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
JAN	160.2	171.2	143.1	149.7	182.0	240.7	166.8	217.6	117.8	141.3	217.8	214.9	193.0	216.6	150.4
FEV	122.7	208.4	185.2	164.1	181.0	194.1	217.8	138.8	187.2	95.3	142.7	201.8	162.3	240.4	127.2
MAR	119.9	174.5	146.6	154.2	217.0	162.7	143.0	205.1	164.2	118.8	199.2	179.2	186.4	250.0	163.8
ABR	99.9	128.4	86.4	86.6	184.5	138.7	121.9	125.1	100.0	91.4	138.2	134.3	116.1	159.4	100.0
MAI	56.6	74.5	43.8	60.4	108.0	91.8	76.4	102.4	128.2	62.4	85.9	123.6	57.4	89.4	77.9
JUN	27.2	44.5	47.1	27.6	59.0	47.1	67.3	55.7	65.1	26.9	95.1	68.5	37.1	49.4	37.1
JUL	11.5	20.6	40.7	29.8	31.9	23.6	32.4	28.5	32.9	12.4	49.2	36.3	17.1	32.1	23.5
AGO	7.7	8.2	35.6	30.6	14.1	19.6	25.2	11.9	13.5	18.3	22.3	44.6	6.4	27.4	22.0
SET	37.8	9.6	58.9	47.9	20.0	84.6	38.4	7.5	27.8	48.1	37.9	19.5	30.1	69.4	29.4
OUT	65.5	75.7	48.0	95.0	61.7	125.1	51.0	48.1	78.0	70.2	111.3	46.9	23.3	81.9	56.1
NOV	112.6	98.4	150.9	83.4	63.5	134.5	66.2	66.1	74.8	143.7	160.0	118.9	111.5	150.1	150.1
DEZ	176.9	153.2	223.5	79.1	154.3	203.2	135.4	120.1	129.3	194.2	189.9	134.8	137.8	162.1	230.8

FIGURA 4.34 – PERÍODO DO ARMAZENAMENTO MÁXIMO (AZUL) E MÍNIMO (VERMELHO) DE CADA ANO NA CAMADA SUPERIOR DO SOLO

mês	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
JAN	972.7	1066.7	1045.3	1114.1	1025.6	1085.2	1132.7	1062.6	986.7	1027.3	1114.9	1147.0	1077.4	1060.2	1102.9
FEV	1022.5	1122.8	1093.7	1131.2	1089.1	1144.0	1166.0	1104.4	1051.8	1040.9	1139.8	1179.1	1116.7	1140.7	1109.8
MAR	1039.8	1149.9	1115.7	1138.3	1138.4	1156.4	1169.7	1134.4	1096.1	1044.1	1155.5	1186.2	1140.2	1191.9	1119.2
ABR	1052.9	1156.0	1110.1	1128.9	1174.9	1161.2	1160.9	1151.1	1105.6	1051.9	1168.3	1184.2	1147.8	1209.2	1122.0
MAI	1046.1	1141.4	1082.7	1104.5	1178.5	1153.3	1144.3	1146.1	1115.5	1045.4	1156.8	1179.2	1126.2	1193.5	1109.1
JUN	1022.6	1116.2	1059.0	1074.4	1159.7	1131.5	1127.0	1131.0	1116.3	1023.8	1148.5	1166.6	1096.0	1165.0	1087.2
JUL	983.6	1077.4	1037.2	1039.2	1123.7	1092.8	1097.9	1096.6	1088.3	985.1	1129.2	1133.5	1055.8	1125.9	1050.8
AGO	927.4	1016.2	1002.0	997.3	1064.1	1036.6	1046.5	1037.9	1032.7	936.0	1077.6	1086.7	994.4	1071.9	1000.6
SET	887.5	945.8	974.0	961.7	996.8	1010.7	995.4	965.4	973.4	906.6	1020.6	1026.5	939.0	1033.3	949.9
OUT	881.7	923.3	945.6	961.8	958.1	1025.6	957.1	919.0	952.9	904.0	1011.4	973.2	888.3	1014.8	920.5
NOV	923.1	946.5	985.5	971.8	945.0	1052.8	941.9	911.3	954.0	960.3	1051.8	985.0	911.7	1041.2	970.8
DEZ	1003.5	1000.6	1074.5	970.4	989.9	1101.5	977.4	946.8	984.7	1043.6	1101.2	1021.9	973.1	1080.2	1069.4

FIGURA 4.35 – PERÍODO DO ARMAZENAMENTO MÁXIMO (AZUL) E MÍNIMO (VERMELHO) DE CADA ANO NA CAMADA INFERIOR DO SOLO

Os armazenamentos de água nas camadas superior e inferior do solo ocorrem com diferença de fase de aproximadamente 2 meses. De maneira geral, a variação anual do armazenamento na camada superior do solo é caracterizada por um mínimo no final do inverno e início da primavera (agosto e setembro), que é o final da estação seca, e um máximo no verão (dezembro a fevereiro). Na camada inferior do solo, a variação do armazenamento de água é caracterizada por um mínimo no final da primavera (entre setembro e outubro) e um máximo no início do outono (março e abril).

A figura 4.36 ilustra a variabilidade do escoamento superficial e de base (inclui o escoamento subsuperficial) simulados pelo modelo 3R para o período 1987-2001, onde a média do escoamento de base simulado é de 16 mm mês⁻¹.

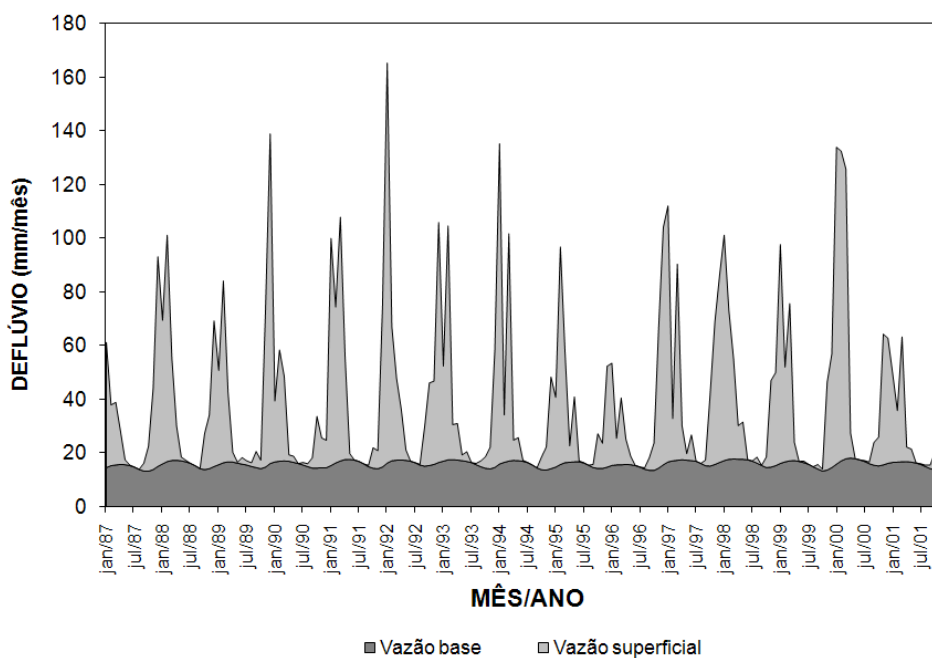


FIGURA 4.36 – SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DE BASE PRODUZIDOS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA DE PLUVIÔMETROS EM EMBORÇAÇÃO

O efeito da modelagem de propagação de cheias do modelo 3R está ilustrado na

figura 4.37 que compara as séries mensais da soma dos escoamentos superficial e de base simulados sem propagação (somente o balanço hídrico mensal do solo) e com propagação.

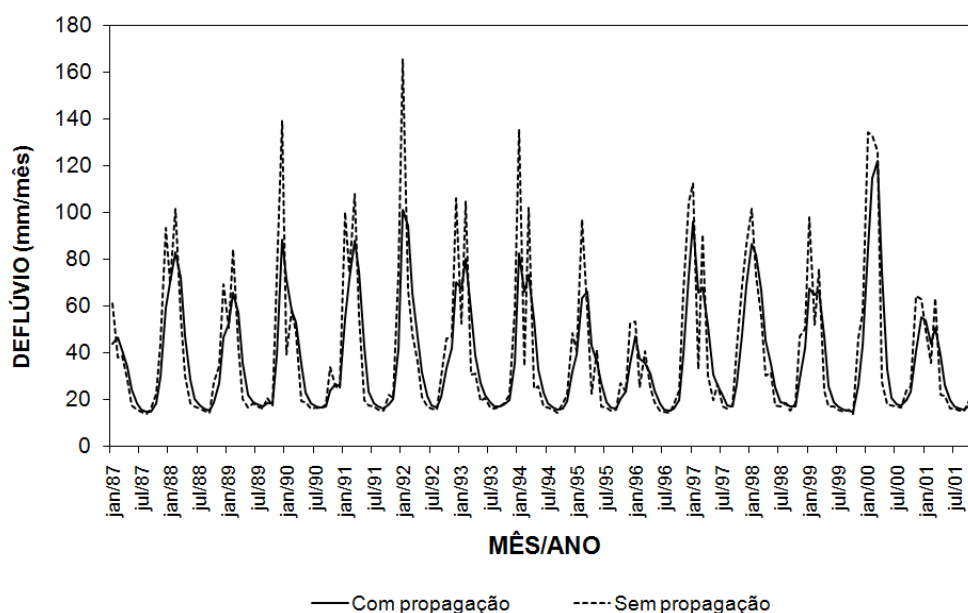


FIGURA 4.37 – COMPARAÇÃO DA SOMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DE BASE SIMULADOS SEM PROPAGAÇÃO E COM PROPAGAÇÃO DE CHEIAS PARA 1987-2001 EM EMBORÇAÇÃO

Nota-se que mesmo com resolução mensal é necessária a adoção de um modelo de propagação de cheias, conforme a figura 4.37 ilustra através da superestimativa das vazões de pico quando se exclui a propagação de cheias.

Em conclusão, o modelo 3R aplicado para Emborcação no período 1987-2001 usando como dado de entrada a chuva média na bacia estimada com pluviômetros simulou adequadamente a fase e pico dos hidrogramas tanto para os anos úmidos quanto para os anos secos.

4.2.5 Análise das previsões

4.2.5.1 Análise da previsão de vazão

A previsão de vazões foi obtida utilizando-se os dados de chuva prevista como entrada para o modelo 3R calibrado com a chuva observada em pluviômetros para o período 1987 – 2001.

Considerou-se o erro da previsão como a diferença entre a vazão prevista e a observada. A tabela 4.11 lista a média e o desvio padrão dos erros da previsão de vazão, bem

como a correlação entre vazão prevista e observada para os horizontes de previsão de um, dois e três meses.

TABELA 4.11 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DAS VAZÕES PREVISTAS COM A CHUVA DO EUROBRISA PARA OS HORIZONTES DE PREVISÃO DE 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES EM EMBORCAÇÃO

Estatística	Q_{prev} (1 mês)	Q_{prev} (2 meses)	Q_{prev} (3 meses)
Média da vazão observada		38,6 mm mês ⁻¹	
Desvio padrão da vazão observada		28,5 mm mês ⁻¹	
Média da vazão prevista	36,6 mm mês ⁻¹	36,7 mm mês ⁻¹	38,3 mm mês ⁻¹
Desvio padrão da vazão prevista	18,3 mm mês ⁻¹	18,8 mm mês ⁻¹	22,4 mm mês ⁻¹
Média do erro	-2,1 mm mês ⁻¹	-1,7 mm mês ⁻¹	0,1 mm mês ⁻¹
Desvio padrão do erro	19,4 mm mês ⁻¹	21,0 mm mês ⁻¹	21,8 mm mês ⁻¹
Correlação PREV-OBS	0,74	0,68	0,66

A análise dos dados listados na tabela 4.11 indica que:

- O erro médio da previsão com horizonte de um mês corresponde a 5% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 64% do desvio padrão da vazão observada;
- O erro médio da previsão com horizonte de dois meses corresponde a 4% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 66% do desvio padrão da vazão observada;
- O erro médio da previsão com horizonte de três meses corresponde a 0,3% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 79% do desvio padrão da vazão observada;
- A média da vazão prevista aproxima-se da média da vazão observada conforme o horizonte de previsão aumenta, assim como o desvio padrão da vazão prevista aproxima-se do desvio padrão da vazão observada;
- O erro médio diminui com o horizonte de previsão, enquanto que o desvio padrão do erro aumenta;
- A correlação entre a vazão prevista e observada diminui com o horizonte de previsão, sendo 0,74 para um mês, 0,68 para dois meses e 0,66 para três meses.

As figuras 4.38, 4.39 e 4.40 ilustram as intercomparações entre os hidrogramas previstos e observados para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses, e 3 meses, respectivamente.

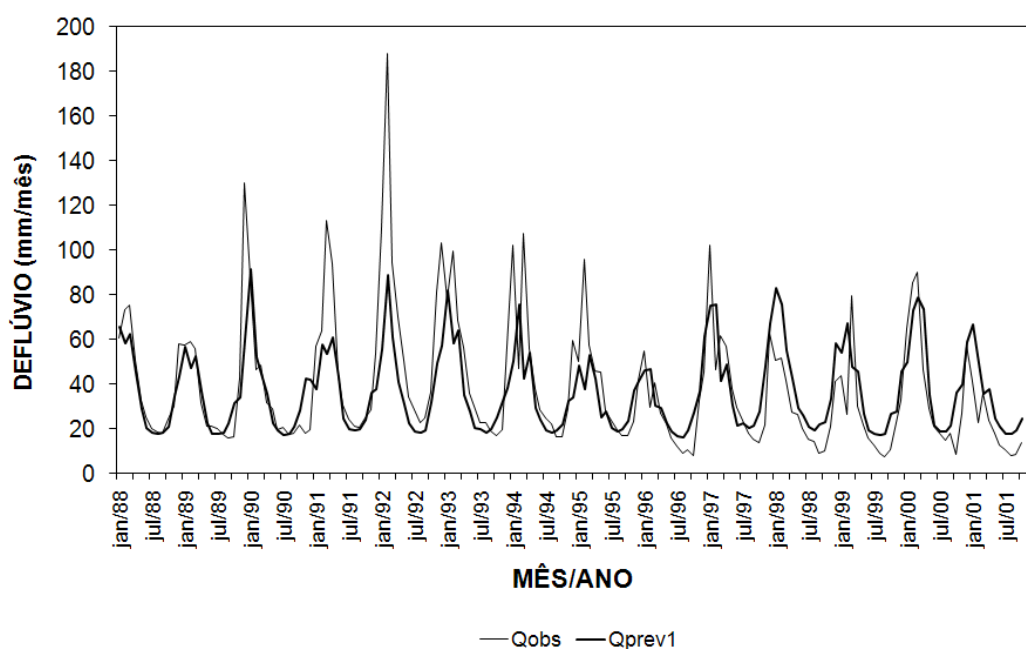


FIGURA 4.38 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM EMBORCAÇÃO

A vazão prevista para o horizonte de previsão de 1 mês (figura 4.38) representa adequadamente as recessões e as subidas dos hidrogramas. Os picos de 1988, 1989, 1993, 1996, 1999, 2000 e 2001 foram previstos adequadamente. Os picos foram subestimados para os anos de 1990, 1991, 1992, 1994 e 1995, enquanto que para os anos de 1998 e 2001 eles foram superestimados.

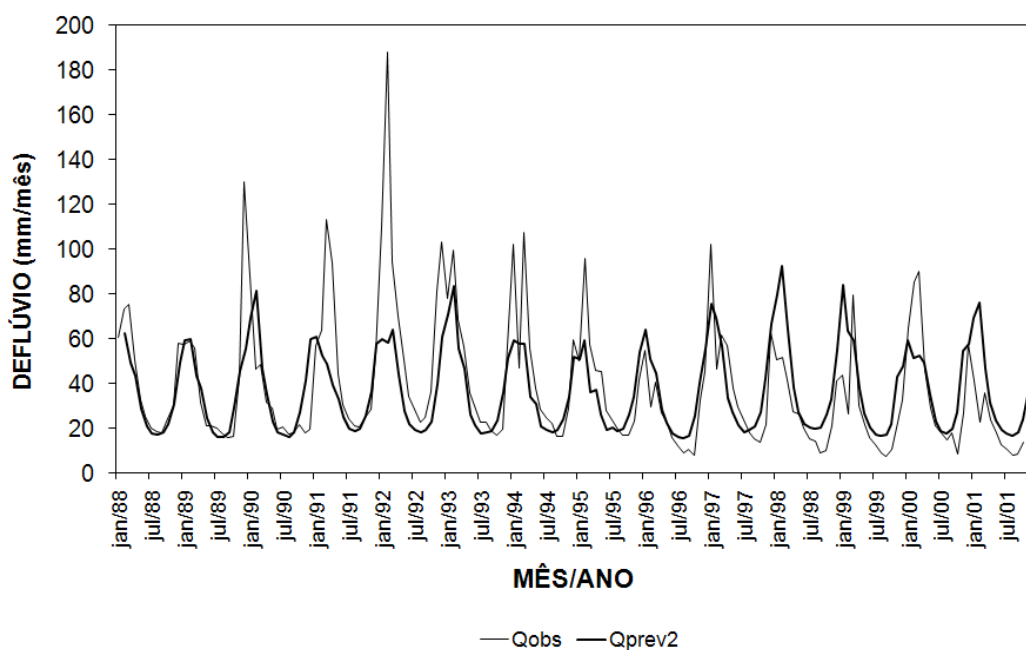


FIGURA 4.39 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM EMBORCAÇÃO

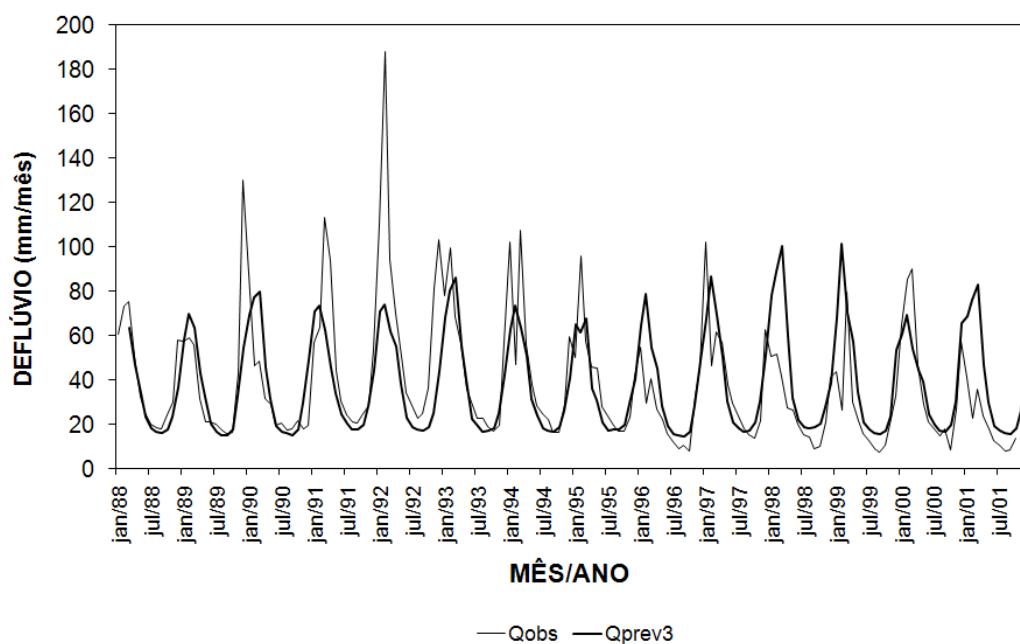


FIGURA 4.40 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM EMBORCAÇÃO

Para os picos das vazões previstas com 2 e 3 meses de antecedência, verificou-se que:

- Os picos de 1989, 1993, 1996 e 1997 foram previstos de maneira mais adequada simultaneamente para os dois horizontes de previsão;
- Os picos foram subestimados em: 1990, 1991, 1992, 1994, 1995 e 2000;
- Os picos foram superestimados em 1998, 1999 e 2001.

Portanto, as chuvas previstas pelo EUROBRISA com horizonte de três meses, associadas ao modelo 3R calibrado com os dados de chuva observada nos pluviômetros produzem previsões de vazões adequadas para a programação da geração hidrelétrica no caso de Emborcação. Todavia, a tendência a subestimar os picos requer cautela na aplicação direta das vazões previstas para o controle de cheias.

Foi realizada a análise da previsão de vazões através da comparação com as vazões modeladas a partir da chuva perfeita. A tabela 4.12 apresenta as estatísticas entre a vazão modelada (obtida a partir da chuva perfeita) e a vazão prevista (obtida a partir da previsão de chuva). As figuras 4.41, 4.42 e 4.43 mostram os gráficos de comparação entre vazões modeladas e previstas para os três horizontes de previsão considerados.

TABELA 4.12 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DAS VAZÕES PREVISTAS COM AS VAZÕES MODELADAS PARA OS HORIZONTES DE PREVISÃO DE 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES EM EMBORCAÇÃO

Estadística	Q _{prev} (1 mês)	Q _{prev} (2 meses)	Q _{prev} (3 meses)
Média da vazão modelada		38,8 mm mês ⁻¹	
Desvio padrão da vazão modelada		24,3 mm mês ⁻¹	
Média da vazão prevista	36,6 mm mês ⁻¹	36,7 mm mês ⁻¹	38,3 mm mês ⁻¹
Desvio padrão da vazão prevista	18,3 mm mês ⁻¹	18,8 mm mês ⁻¹	22,4 mm mês ⁻¹
Média do erro	-2,7 mm mês ⁻¹	-2,1 mm mês ⁻¹	0,0 mm mês ⁻¹
Desvio padrão do erro	13,4 mm mês ⁻¹	15,3 mm mês ⁻¹	14,1 mm mês ⁻¹
Correlação PREV-OBS	0,90	0,82	0,82

Novamente, como no caso da usina de Furnas, a análise com chuva perfeita resultou em coeficientes de correlação entre as vazões modeladas e previstas (tabela 4.12) maiores que os coeficientes de correlação entre vazões observadas e previstas (tabela 4.11).

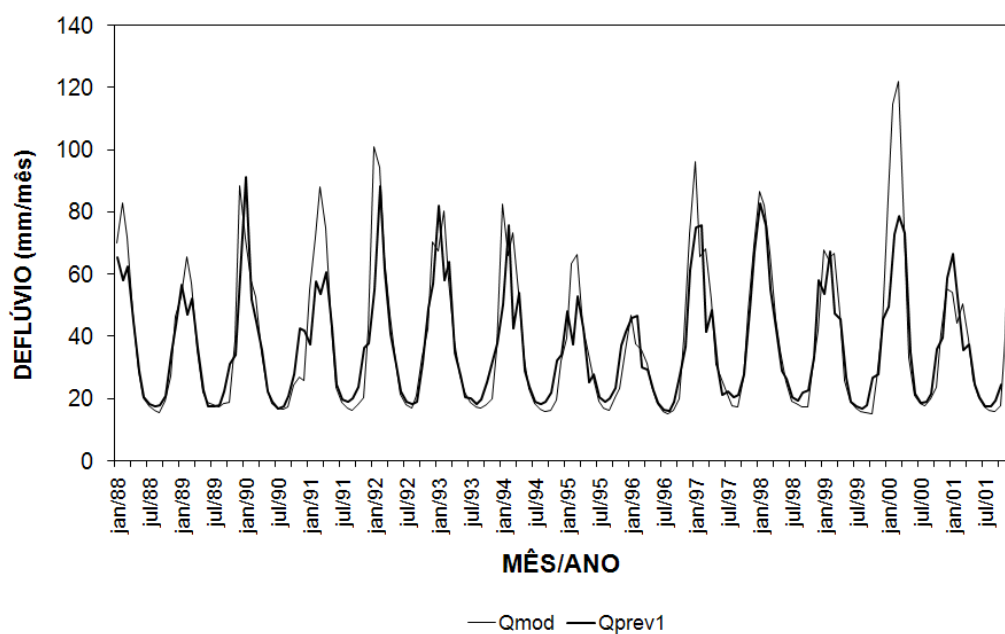


FIGURA 4.41 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM EMBORCAÇÃO

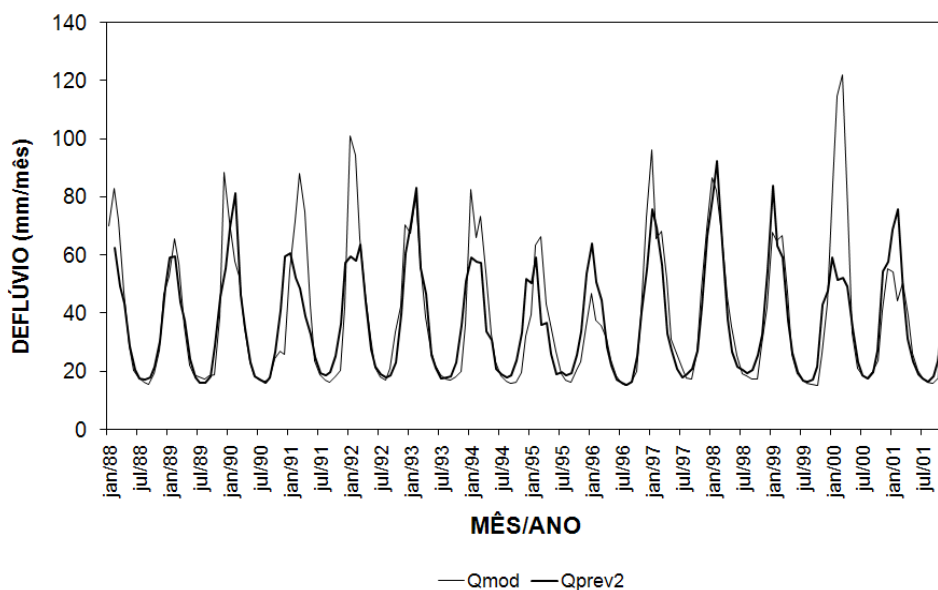


FIGURA 4.42 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM EMBORCAÇÃO

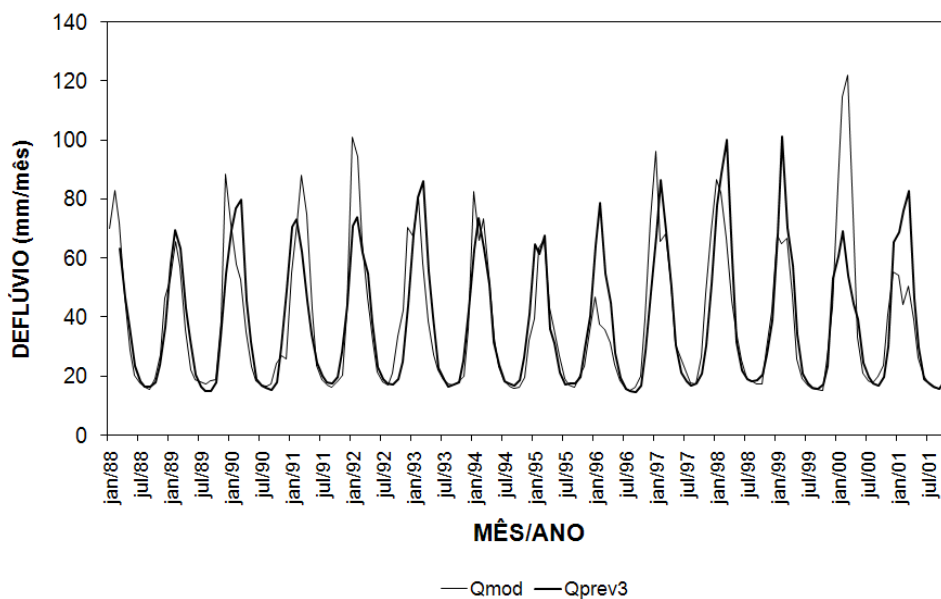


FIGURA 4.43 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM EMBORCAÇÃO

4.2.5.2 Análise das previsões de chuva e vazão condicionada aos extremos da estação chuvosa

Assim como a bacia de Furnas, a bacia de Emborcação possui sazonalidade bem definida. Novamente, é possível determinar o período chuvoso para essa bacia como o período compreendido entre os meses de setembro e março.

Para avaliar a previsão de chuvas, pode-se construir um gráfico de correlação entre anomalias previstas e anomalias observadas que obedece aos condicionantes explicados anteriormente na seção 4.1.5.2.

A figura 4.44 apresenta o gráfico de correlação entre anomalias previstas e observadas para a bacia incremental de Emborcação. A partir desse gráfico, são calculadas as taxas de acerto e erro.

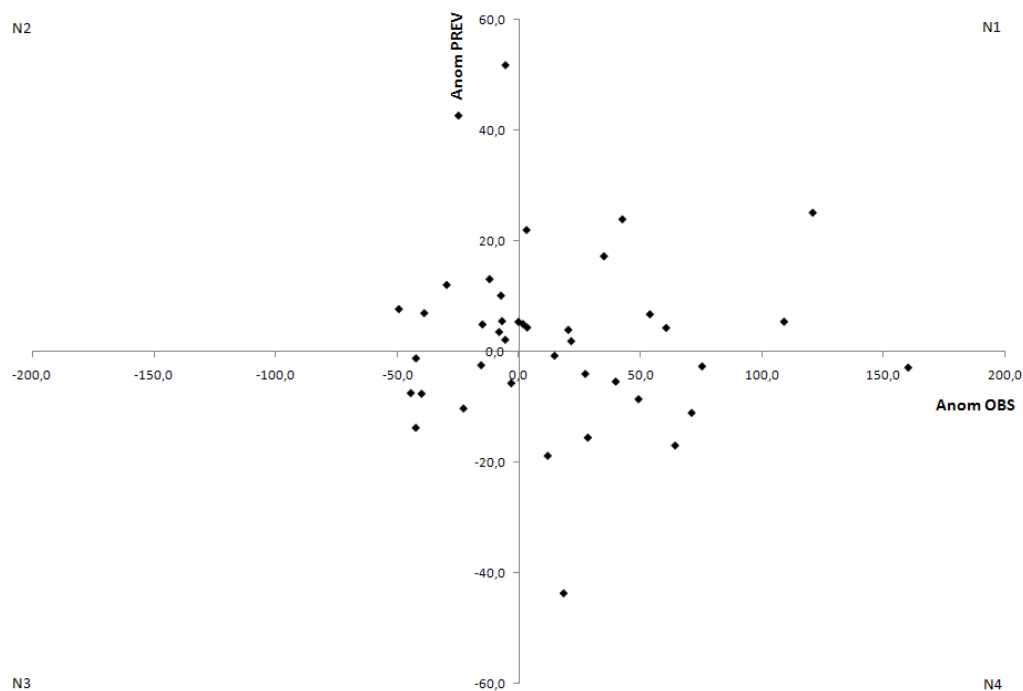


FIGURA 4.44 – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIAS OBSERVADAS E PREVISTAS DE CHUVA EM EMBORCAÇÃO

As taxas de acerto e erro são calculadas através da contagem de pontos existentes nos quadrantes N1, N2, N3 e N4. A tabela 4.13 apresenta os valores necessários para calcular essas taxas para a bacia incremental de Emborcação.

TABELA 4.13 – NÚMERO DE CASOS EXISTENTES NOS QUADRANTES N1 A N4 NO GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DE PREVISÃO DE CHUVA PARA EMBORCAÇÃO

Caso	Número de casos	Observação
$Anom_{obs} > 0 \cap Anom_{prev} > 0$	11	Quadrante N1
$Anom_{obs} < 0 \cap Anom_{prev} > 0$	12	Quadrante N2
$Anom_{obs} < 0 \cap Anom_{prev} < 0$	7	Quadrante N3
$Anom_{obs} > 0 \cap Anom_{prev} < 0$	11	Quadrante N4

A partir dos dados da tabela 4.13, foram obtidas as taxas de acerto e erro na previsão de chuvas para Emborcação:

Taxa de acerto: 40%

Taxa de erro: 60%

Para avaliar as vazões previstas para o horizonte de 1 mês, são utilizados os mesmos condicionantes impostos para a análise da previsão de chuvas. O gráfico de correlação entre as anomalias de vazão observada e prevista é apresentado na figura 4.45.

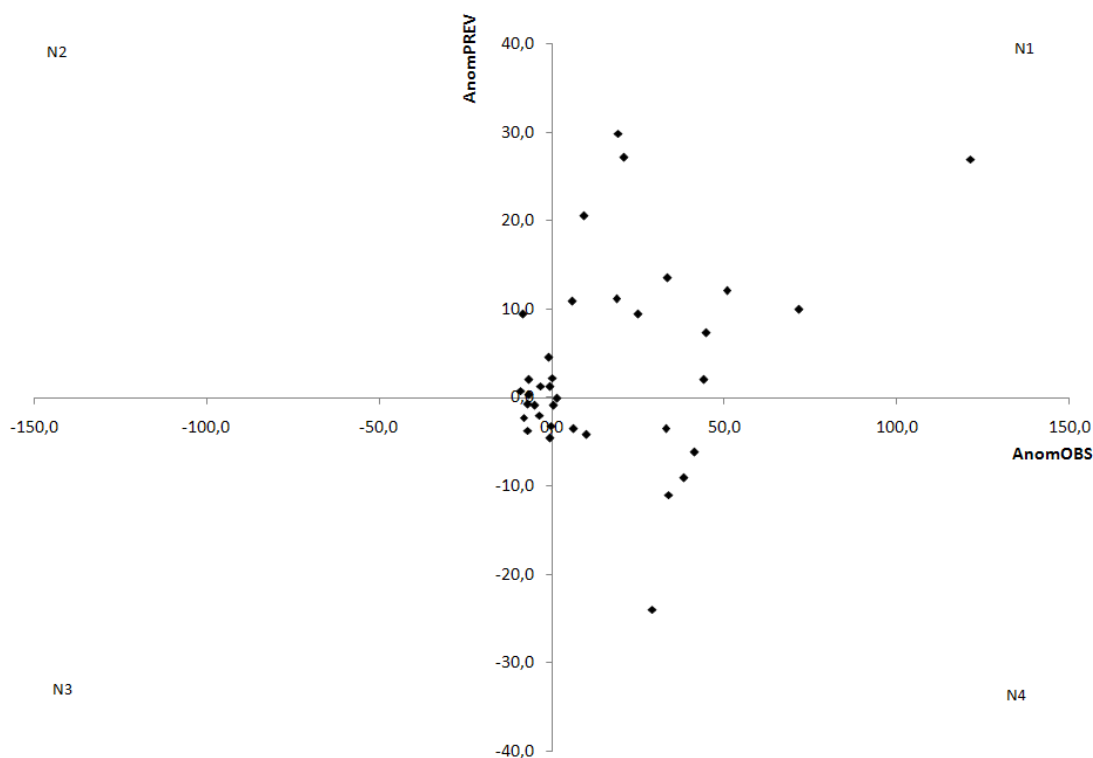


FIGURA 4.45 – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIAS OBSERVADAS E PREVISTAS DE VAZÃO EM EMBORCAÇÃO

A tabela 4.14 apresenta a contagem de pontos em cada quadrante do gráfico de correlação, necessária para calcular a taxa de acerto e a taxa de erro na previsão de vazão com horizonte de um mês para a bacia incremental de Emborcação.

TABELA 4.14 – NÚMERO DE CASOS EXISTENTES NOS QUADRANTES N1 A N4 NO GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DE PREVISÃO DE VAZÃO PARA EMBORCAÇÃO

Caso	Número de casos	Observação
$Anom_{obs} > 0 \cap Anom_{prev} > 0$	14	Quadrante N1
$Anom_{obs} < 0 \cap Anom_{prev} > 0$	7	Quadrante N2
$Anom_{obs} < 0 \cap Anom_{prev} < 0$	7	Quadrante N3
$Anom_{obs} > 0 \cap Anom_{prev} < 0$	8	Quadrante N4

As taxas de acerto e erro são calculadas da mesma forma utilizada na avaliação da previsão de chuva, e foram obtidos os seguintes valores:

Taxa de acerto: 58%

Taxa de erro: 42%

4.3 BACIA DO RIO IGUAÇU – USINA DE FOZ DO AREIA

4.3.1 Variabilidade espaço-temporal das vazões naturais

A variabilidade espacial foi verificada para a usina de Foz do Areia, bacia do rio Iguaçu, para o período 1942 – 2007, com o objetivo de identificar-se o comportamento do regime anual de vazões e da série histórica para a bacia.

4.3.1.1 Variabilidade sazonal

A figura 4.46 ilustra o ciclo anual dos deflúvios no Rio Iguaçu, em Foz do Areia, incluindo uma banda de variação de um desvio padrão.

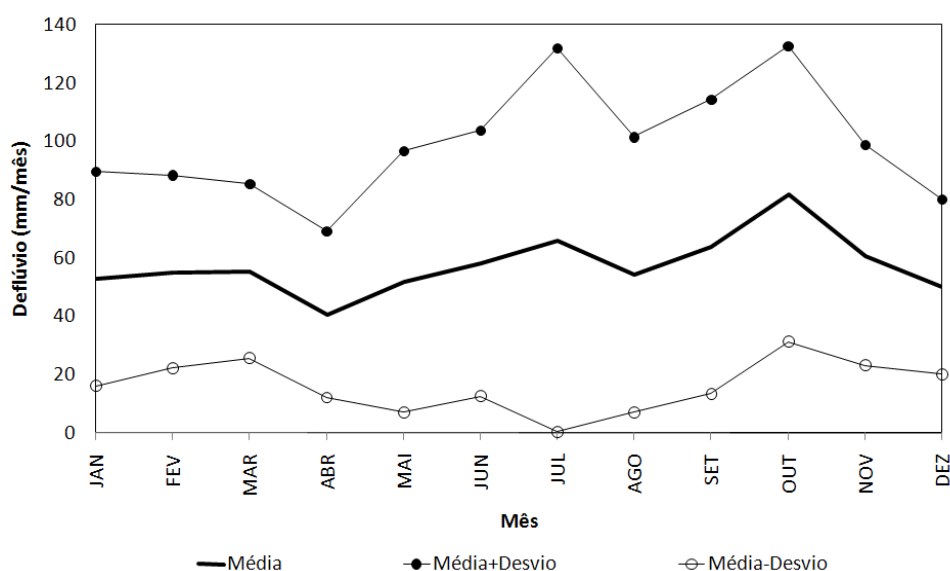


FIGURA 4.46 – CICLO ANUAL DOS DEFLÚVIOS PARA O RIO IGUAÇU EM FOZ DO AREIA

O deflúvio médio de longo termo no Rio Iguaçu, em Foz do Areia, é 692 mm/ano e seu desvio padrão é 269 mm/ano para o período 1942-2007. O período selecionado para a verificação do índice de acerto das previsões mensais de vazão foi 1987-2001, cuja média e desvio padrão são 855 mm/ano e 283 mm/ano, respectivamente.

As vazões para esta bacia não variam com sazonalidade definida. Nota-se que o deflúvio para cada mês não varia muito com relação à média, e por isso não há ocorrência de períodos secos e úmidos que possam demonstrar uma sazonalidade. A variabilidade de vazões é grande, sendo que em julho observa-se a maior variação de vazão em uma faixa de aproximadamente 0 a 130 mm/mês. Os meses com menor variabilidade são março e

dezembro, que apresentam desvios próximos a 30 mm/mês.

O índice de armazenamento do reservatório é proveniente da razão entre volume útil e vazão média de longo termo (MLT). Para Foz do Areia, o volume útil do reservatório é igual a $3804,7 \text{ hm}^3$ (tabela 3.8) e a MLT é igual a $57.10^6 \text{ m}^3/\text{dia}$. Desse modo, o índice de armazenamento corresponde a aproximadamente 67 dias, sendo um reservatório relativamente menor do que os de Furnas e Emborcação, na região Sudeste. Como o regime de chuvas na região Sul é bem distribuído ao longo do ano, então os reservatórios da região Sul têm um volume útil menor do que os da região Sudeste, onde a sazonalidade da chuva é bem definida.

4.3.2 Variabilidade interanual

A figura 4.47 ilustra a série dos deflúvios anuais no Rio Iguaçu, em Foz do Areia, para o período de 1942 a 2004. O período de verificação das previsões de vazão, 1987-2001, está destacado com a linha mais grossa, com círculos.

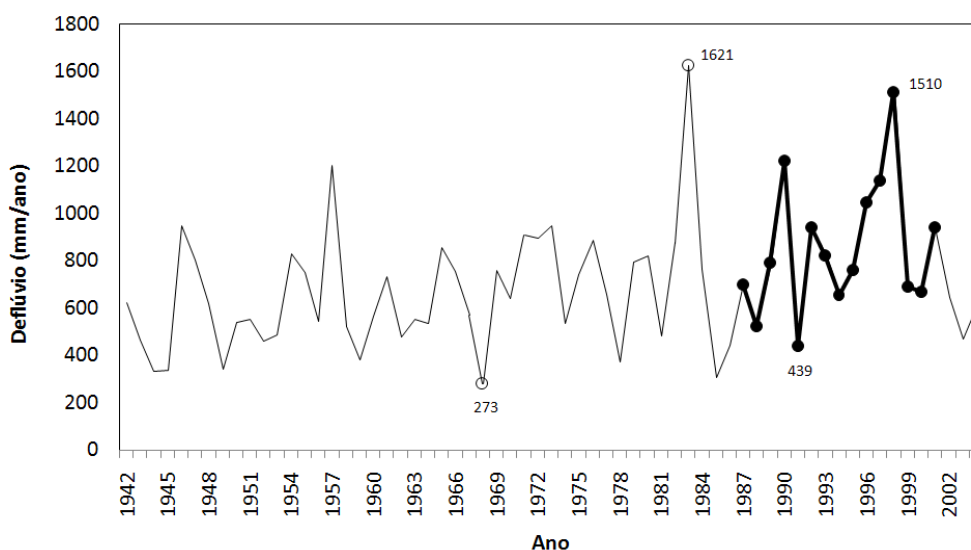


FIGURA 4.47 – VARIABILIDADE INTERANUAL DOS DEFLÚVIOS EM MM/ANO PARA O RIO IGUAÇU EM FOZ DO AREIA

O deflúvio anual máximo da série ocorreu em 1983, com 1621 mm/ano, e o mínimo foi registrado em 1968, com 273 mm/ano. Para o período de verificação selecionado, o máximo anual foi observado em 1998, com 1510 mm/ano, e o mínimo em 1991 com 439 mm/ano. O período de verificação apresenta eventos secos e úmidos com ordem de grandeza próxima aos mínimos e máximos da série histórica.

A figura 4.48 mostra a variabilidade do deflúvio em mm/mês para o período de verificação 1987 - 2001. A partir do hidrograma mensal, observa-se que há grande quantidade de picos, pois a região Sul não possui sazonalidade definida. A variabilidade interanual do escoamento de base foi significativa no período, variando entre 20 e 50 mm/mês, aproximadamente.

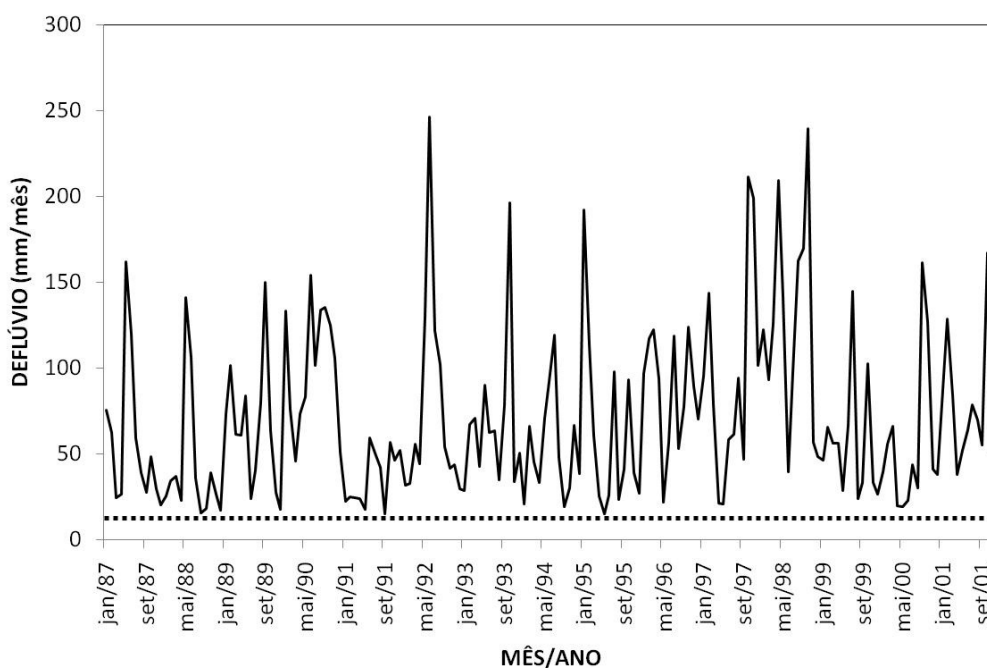


FIGURA 4.48 – VARIABILIDADE INTERANUAL DOS DEFLÚVIOS EM MM/MÊS PARA O RIO IGUAÇU EM FOZ DO AREIA NO PERÍODO 1987 – 2001

4.3.3 Análise da previsão de chuvas

O gráfico da figura 4.49 mostra a chuva prevista em Foz do Areia, calculada a partir dos dados de chuva observada, e a chuva observada, ambas com resolução trimestral. A chuva observada possui valores que variaram entre 20 e 300 mm/mês, enquanto que a chuva prevista variou entre valores de 60 e 200 mm/mês. No gráfico, observa-se que a chuva prevista quantificou a chuva observada de maneira mais adequada para valores em torno de 100 a 150 mm/mês. Os picos mais altos não foram reproduzidos pela chuva prevista. Alguns períodos de estiagem foram bem representados, como aqueles referentes aos anos de 1994, 1996, 1998 e 1999, no entanto a chuva relacionada aos períodos de estiagem restantes foi superestimada. De modo geral, a previsão de chuvas é conservadora e estável em torno da média de 150 mm/mês, subestima os picos e superestima os períodos de estiagem.

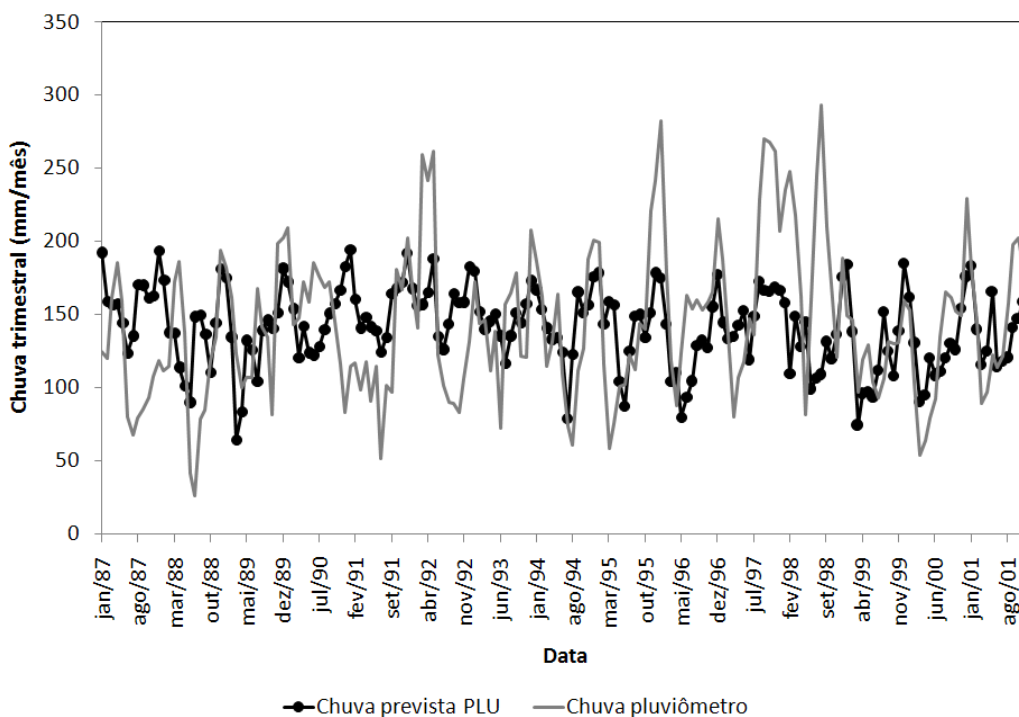


FIGURA 4.49 – VALORES DE CHUVA OBSERVADA E CHUVA PREVISTA EM RESOLUÇÃO TRIMESTRAL PARA O APROVEITAMENTO DE FOZ DO AREIA (PERÍODO 1987 – 2001)

A comparação dos dados trimestrais de chuva prevista com os dados trimestrais de chuva observada nos pluviômetros resultou em erro médio igual a -1,4 mm/mês e desvio padrão de 49,6 mm/mês (tabela 4.15).

TABELA 4.15 – ERRO MÉDIO, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE CHUVA OBSERVADA E CHUVA PREVISTA PARA O APROVEITAMENTO DE FOZ DO AREIA

Aproveitamento hidrelétrico	Foz do Areia
Erro médio (mm/mês)	-1,4
Desvio padrão do erro (mm/mês)	49,6
Coefficiente de correlação	0,32

FONTE: A autora (2010)

A figura 4.50 mostra a frequência acumulada da chuva prevista, calculada a partir da média e desvio padrão da chuva observada nos pluviômetros, e da chuva observada nos pluviômetros. Observa-se que nos percentis menores, abaixo de 60%, a chuva prevista superestima a chuva observada, sendo que a diferença entre esses dois tipos de dados permanece em torno de 20 mm/mês. Para os percentis acima de 60%, que representam os períodos mais úmidos, a chuva prevista subestima a chuva observada, e a diferença entre esses dados atinge valores de até 100 mm/mês.

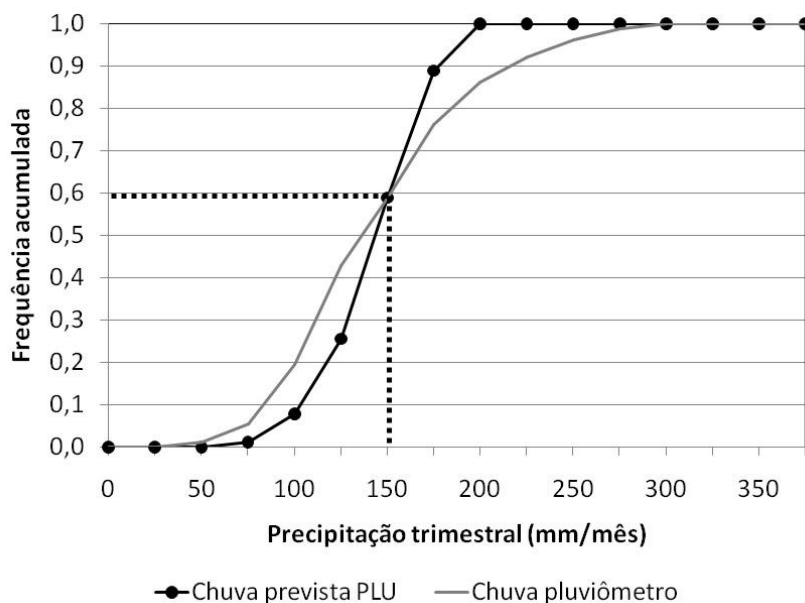


FIGURA 4.50 – FREQUÊNCIA ACUMULADA DAS PRECIPITAÇÕES OBSERVADA E PREVISTA EM RESOLUÇÃO TRIMESTRAL EM FOZ DO AREIA

4.3.4 Análise da consistência conjunta dos dados mensais

A figura 4.51 apresenta o comportamento do armazenamento de água no solo na bacia de Foz do Areia, obtido através do modelo “Balmes” para três diferentes coeficientes multiplicadores da evapotranspiração potencial.

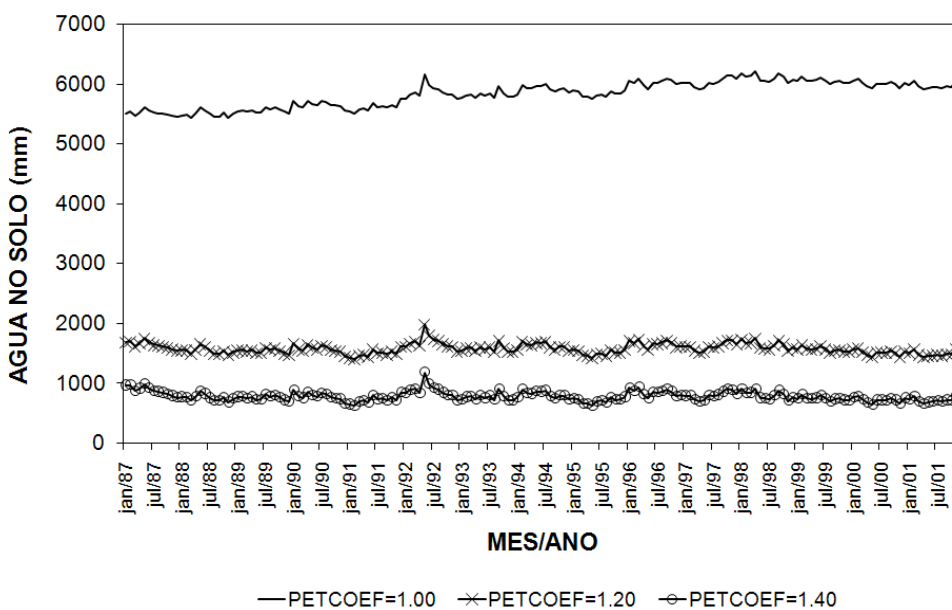


FIGURA 4.51 – VARIAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA A CHUVA ESTIMADA COM PLUVIÔMETROS EM FOZ DO AREIA, APLICANDO-SE TRÊS DIFERENTES COEFICIENTES PARA A CORREÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (1,0; 1,2 E 1,4)

Observa-se que os dados climatológicos de evapotranspiração potencial, quando considerados multiplicados por um fator igual a 1,0, requerem que o armazenamento da água no solo seja superior a 5000 mm, que é um valor excessivamente alto. Então foi aplicado um coeficiente de 1,2 para majorar os valores climatológicos de evapotranspiração potencial, que produziu um armazenamento da ordem de 1500 mm e uma variabilidade da ordem de 600 mm. Aumentando o coeficiente para 1,4, o armazenamento cai para aproximadamente 800 mm. A conclusão desta análise é que a evapotranspiração potencial climatológica foi subestimada e deve ser majorada em pelo menos 20%.

A figura 4.52 ilustra o armazenamento de água no solo obtido para as séries de chuva observada nos pluviômetros e chuva prevista.

A chuva observada em pluviômetros apresentou valores estacionários de armazenamento da água no solo. Isso indica que o balanço hídrico, para esse caso, não apresentou inconsistências e que os dados de chuva, vazão e evapotranspiração estão coerentes entre si. Para o balanço hídrico que utiliza a previsão de chuva como dado de entrada, observa-se que o armazenamento de água no solo apresentou valores altos (em torno de 3250 mm para o período de janeiro de 1987 até janeiro de 1997). A partir de 1997, o armazenamento de água sofre uma queda nos valores, chegando a 2000 mm. Essa queda faz com que os valores de água no solo não sejam estacionários para todo o período de simulação, e provavelmente representa uma falha em algum dos dados de chuva, vazão ou evapotranspiração. Pela figura 4.53, que apresenta o armazenamento de água no solo considerando-se também a chuva observada do GPCP fornecida pelo EUROBRISA, nota-se que para o balanço hídrico realizado com a chuva observada do GPCP também existe uma leve queda no armazenamento de água no solo no final de 1998. No entanto, para a chuva observada nos pluviômetros não há ocorrência desse fenômeno. Possivelmente o erro pode encontrar-se nos dados de anomalias de previsão e chuva observada do GPCP fornecidos pelo projeto EUROBRISA, porque se o erro estivesse nos dados de vazão ou evapotranspiração, a mesma queda seria observada no armazenamento de água no solo para o balanço hídrico realizado com chuva dos pluviômetros.

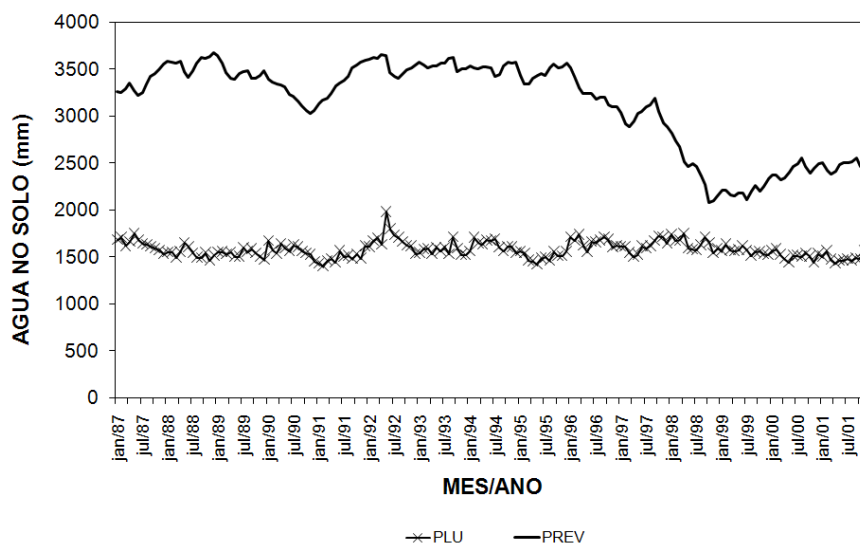


FIGURA 4.52 – COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS E A CHUVA PREVISTA EM FOZ DO AREIA

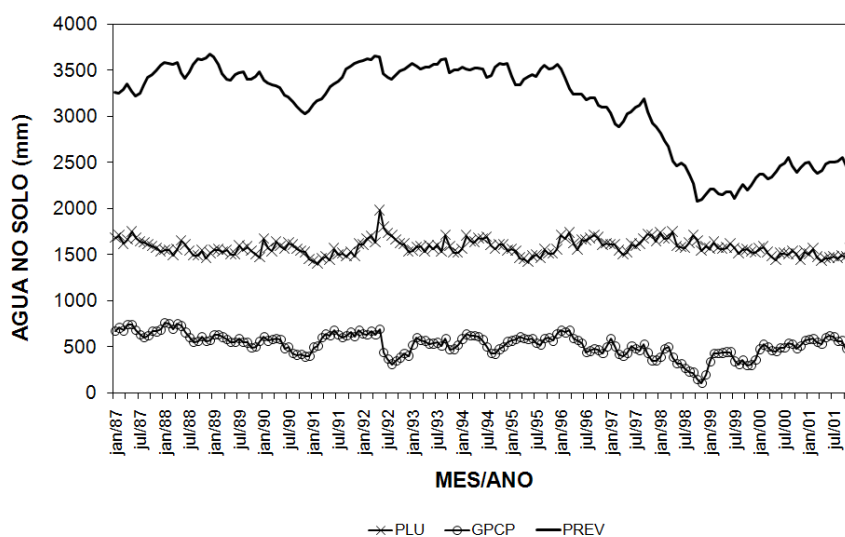


FIGURA 4.53 – COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA A CHUVA OBSERVADA NOS PLUVIÔMETROS, A CHUVA OBSERVADA DO GPCP E A CHUVA PREVISTA EM FOZ DO AREIA

4.3.5 Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico 3R

A calibração usou como dado de entrada a série da chuva média observada na bacia estimada a partir da média aritmética dos registros de pluviômetros. Os parâmetros calibrados são apresentados na tabela 4.16.

TABELA 4.16 – PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO 3R USANDO-SE A CHUVA DOS PLUVIÔMETROS COMO DADO DE ENTRADA EM FOZ DO AREIA

Parâmetro	Descrição	Valor
X_1^o	Capacidade da camada superior do solo	51,1 mm
X_2^o	Capacidade da camada inferior do solo	970 mm
m_1	Expoente da função de escoamento superficial	2,636
C_1	Taxa de recessão do escoamento sub-superficial	0,00006 mês ⁻¹
m_2	Expoente da função de percolação	1,8
m_3	Expoente da função de transpiração	1,0
C_2	Taxa de recessão da camada inferior do solo	0,00221 mês ⁻¹
C_3	Coefficiente de aumento da percolação para o máximo gradiente vertical	127,56
μ	Define fração de recarga do aquífero	0,09618
β	Taxa de recessão da propagação	1,688 mês ⁻¹
M	Expoente da função de propagação	1,0
N	Número de reservatórios conceituais na cascata	2

Nota-se que o valor calibrado do parâmetro $C_1=0,00006$ mês⁻¹ foi muito baixo, ou seja, o escoamento sub-superficial simulado é desprezível. Analogamente, o coeficiente $C_2=0,00221$ mês⁻¹ também foi muito baixo, indicando que os valores simulados da vazão de base e recarga dos aquíferos são negligenciáveis. Se a camada inferior do solo estiver saturada, então a soma da vazão de base e recarga corresponde à $GW=C_2X_2$, ou seja, $GW=0,00221*970=2,1$ mm mês⁻¹.

A tabela 4.17 lista as médias de longo termo (1987-2001) dos fluxos observados e simulados. A chuva observada e a evapotranspiração potencial são dados de entrada para o modelo 3R, a vazão observada é usada para estimar os erros da simulação. A vazão simulada corresponde à saída do modelo 3R, sendo composta pelas simulações do escoamento superficial e pelo escoamento de base (que incluiu o escoamento subsuperficial).

TABELA 4.17 – MÉDIAS DOS FLUXOS OBSERVADOS E SIMULADOS ANUAIS PARA A CALIBRAÇÃO COM CHUVA ESTIMADA POR PLUVIÔMETROS PARA O PERÍODO 1987-2001 EM FOZ DO AREIA

Fluxo	Observado (mm ano ⁻¹)	Simulado (mm ano ⁻¹)
Chuva	1721	
Evapotranspiração Potencial	940	
Evapotranspiração Real		841
Vazão	855	861
Escoamento Base		17
Escoamento Superficial		859
Recarga do Aquífero		2

Na tabela 4.17, observa-se que o coeficiente de escoamento da bacia (razão entre vazão e chuva) é 0,50, ou seja, em média 50% da chuva escoou no rio; a evapotranspiração real simulada corresponde a 89% da evapotranspiração potencial. Os valores somados do

escoamento de base e recarga dos aquíferos são da ordem de 19 mm/mês, que são muito inferiores ao do escoamento superficial de 859 mm/mês.

Os resultados da calibração para Foz do Areia produziram erros médios inferiores a 1% e a correlação entre as vazões observadas e simuladas foi igual a $\rho=0,85$. A figura 4.54 ilustra a comparação entre as vazões observada e modelada para o período 1987-2001, com a chuva média na bacia estimada a partir dos pluviômetros.

O modelo simulou adequadamente os maiores picos do hidrograma, que correspondem aos anos de 1988, 1990, 1992, 1994, 1998 e 1999. Como esta bacia não possui sazonalidade definida, o modelo simulou as vazões com menos precisão do que nos casos em que a sazonalidade é bem definida (Furnas e Emborcação).

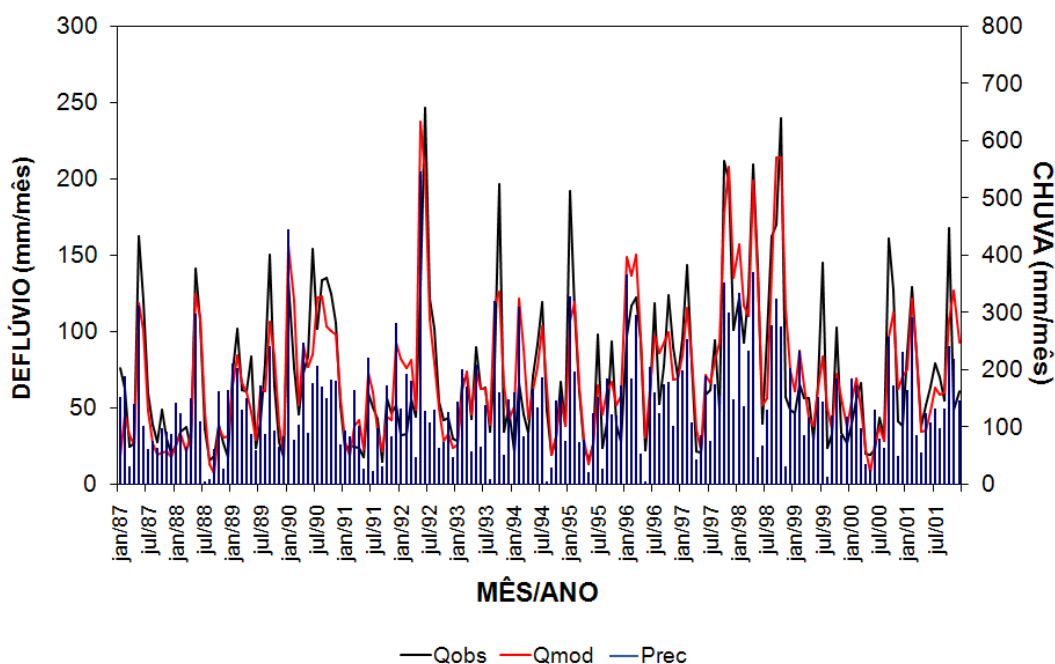


FIGURA 4.54– COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADA E OBSERVADA PRODUZIDAS PELO MODELO 3R CALIBRADO COM A CHUVA DE PLUVIÔMETROS EM FOZ DO AREIA

4.3.6 Análise das previsões

4.3.6.1 Análise da previsão de vazão

A previsão de vazão foi desenvolvida com o modelo 3R calibrado com os parâmetros obtidos com a chuva observada nos pluviômetros, sendo rodado com os dados da

série de chuva observada até o mês “i”, quando se inicia a previsão. Em seguida, o modelo 3R lê os dados da chuva mensal prevista do EUROBRISA para um horizonte de previsão de 3 meses; assim se produz a vazão prevista para os meses “i+1”, “i+2” e “i+3”.

Considerou-se o erro da previsão como a diferença entre a vazão prevista e a observada. A tabela 4.18 lista a média e o desvio padrão dos erros da previsão de vazão, bem como a correlação entre vazão prevista e observada para os horizontes de previsão de um, dois e três meses.

TABELA 4.18 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DAS VAZÕES PREVISTAS COM A CHUVA DO EUROBRISA PARA OS HORIZONTES DE PREVISÃO DE 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES EM FOZ DO AREIA

Estatística	Q_{prev} (1 mês)	Q_{prev} (2 meses)	Q_{prev} (3 meses)
Média da vazão observada		72,4 mm mês ⁻¹	
Desvio padrão da vazão observada		48,9 mm mês ⁻¹	
Média da vazão prevista	67,8 mm mês ⁻¹	65,8 mm mês ⁻¹	65,6 mm mês ⁻¹
Desvio padrão da vazão prevista	30,1 mm mês ⁻¹	17,9 mm mês ⁻¹	17,1 mm mês ⁻¹
Média do erro	-4,6 mm mês ⁻¹	-6,8 mm mês ⁻¹	-7,1 mm mês ⁻¹
Desvio padrão do erro	41,2 mm mês ⁻¹	47,8 mm mês ⁻¹	49,0 mm mês ⁻¹
Correlação PREV-OBS	0,54	0,24	0,17

A análise dos dados listados na tabela 4.18 indica que:

- O erro médio da previsão com horizonte de um mês corresponde a 6% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 62% do desvio padrão da vazão observada;
- O erro médio da previsão com horizonte de dois meses corresponde a 9% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 37% do desvio padrão da vazão observada;
- O erro médio da previsão com horizonte de três meses corresponde a 10% da vazão observada, e o desvio padrão da previsão é 35% do desvio padrão da vazão observada;
- O desvio padrão do erro aumenta com o horizonte de previsão;
- A correlação entre a vazão prevista e observada diminui com o horizonte de previsão, sendo 0,54 para um mês, 0,24 para dois meses e 0,17 para três meses.

As figuras 4.55, 4.56 e 4.57 ilustram as comparações entre os hidrogramas previstos e observados para os horizontes de previsão de 1 mês, 2 meses, e 3 meses, respectivamente.

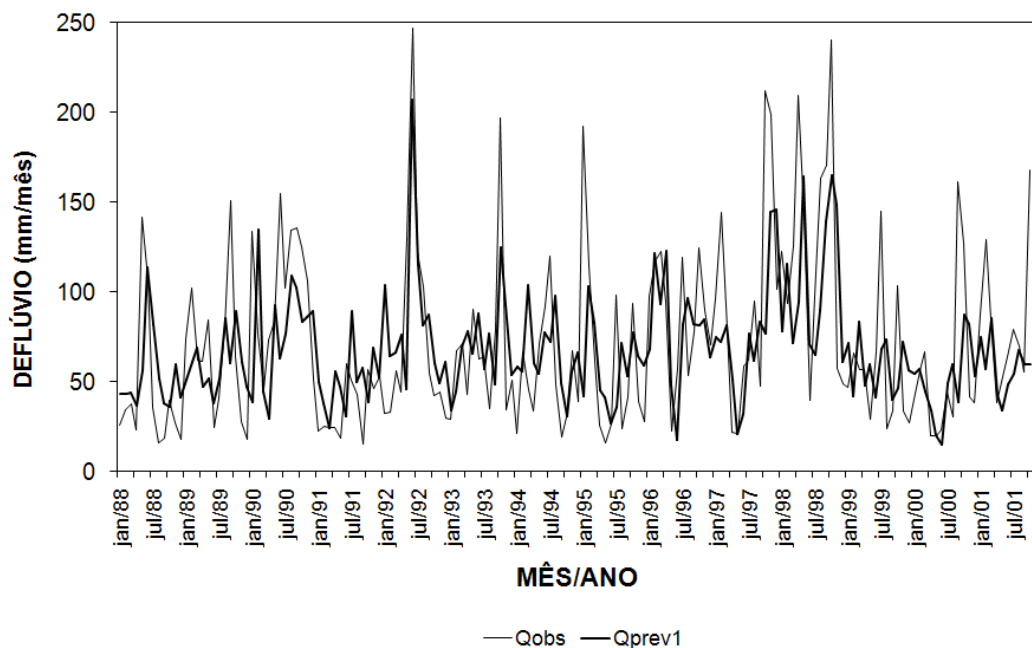


FIGURA 4.55 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM FOZ DO AREIA

As recessões e subidas do hidrograma de vazão observada foram melhor representadas pela vazão prevista para os anos de 1990, 1992, 1993, 1996 e 1997.

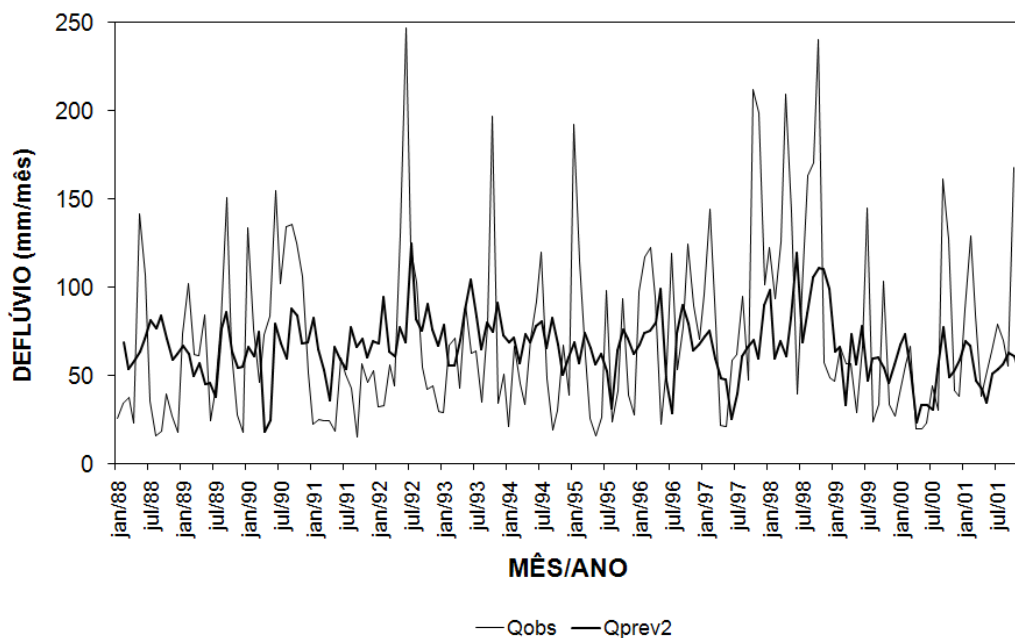


FIGURA 4.56 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM FOZ DO AREIA

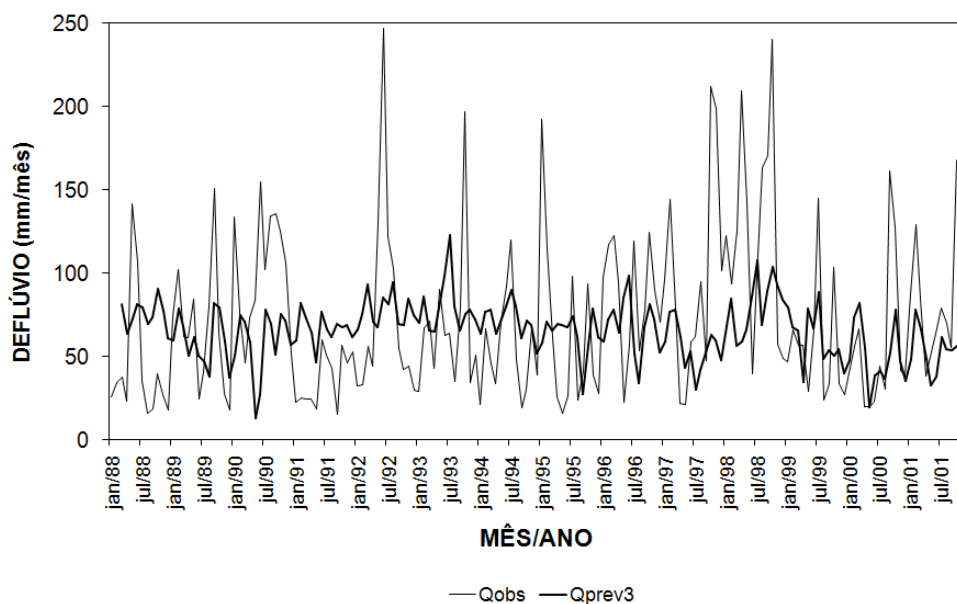


FIGURA 4.57 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM FOZ DO AREIA

Para as previsões de vazão com 2 e 3 meses de antecedência, verificou-se que a previsão não conseguiu representar a maioria dos picos e estiagens do hidrograma observado. As vazões previstas variaram em torno da média, o que não é suficiente para representar o hidrograma observado para Foz do Areia. Esse, além de não apresentar sazonalidade bem definida, apresenta picos e estiagens que variam em quantidade e época de ocorrência de ano para ano. Por este motivo, as previsões de vazões para 2 e 3 meses de antecedência apresentaram baixos coeficientes de correlação devido à dificuldade existente em representar o comportamento não-uniforme das vazões nessa bacia.

É necessário comparar os resultados de vazões previstas com as vazões modeladas a partir da chuva perfeita. A tabela 4.19 apresenta as estatísticas entre a vazão modelada (obtida a partir da chuva perfeita) e a vazão prevista (obtida a partir da previsão de chuva). As figuras 4.58, 4.59 e 4.60 mostram os gráficos de comparação entre vazões modeladas e previstas para os três horizontes de previsão considerados.

TABELA 4.19 – ESTATÍSTICAS DOS ERROS DAS VAZÕES PREVISTAS COM AS VAZÕES MODELADAS PARA OS HORIZONTES DE PREVISÃO DE 1 MÊS, 2 MESES E 3 MESES EM FOZ DO AREIA

Estatística	Q_{prev} (1 mês)	Q_{prev} (2 meses)	Q_{prev} (3 meses)
Média da vazão modelada		73,9 mm mês ⁻¹	
Desvio padrão da vazão modelada		44,0 mm mês ⁻¹	
Média da vazão prevista	67,8 mm mês ⁻¹	65,8 mm mês ⁻¹	65,6 mm mês ⁻¹
Desvio padrão da vazão prevista	30,1 mm mês ⁻¹	17,9 mm mês ⁻¹	17,1 mm mês ⁻¹
Média do erro	-6,9 mm mês ⁻¹	-8,8 mm mês ⁻¹	-8,9 mm mês ⁻¹
Desvio padrão do erro	35,9 mm mês ⁻¹	42,9 mm mês ⁻¹	44,1 mm mês ⁻¹
Correlação PREV-OBS	0,63	0,29	0,19

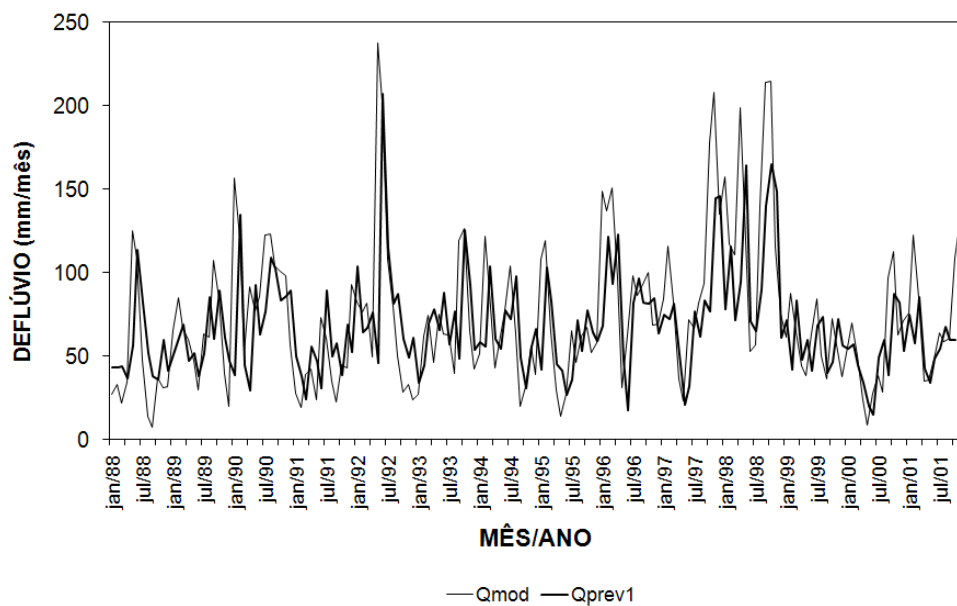


FIGURA 4.58 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 1 MÊS EM FOZ DO AREIA

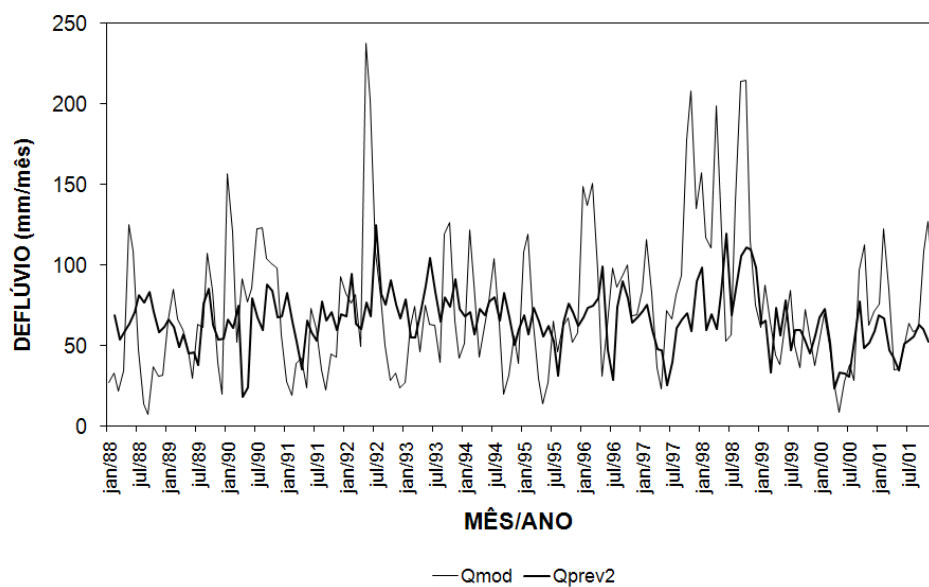


FIGURA 4.59 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 2 MESES EM FOZ DO AREIA

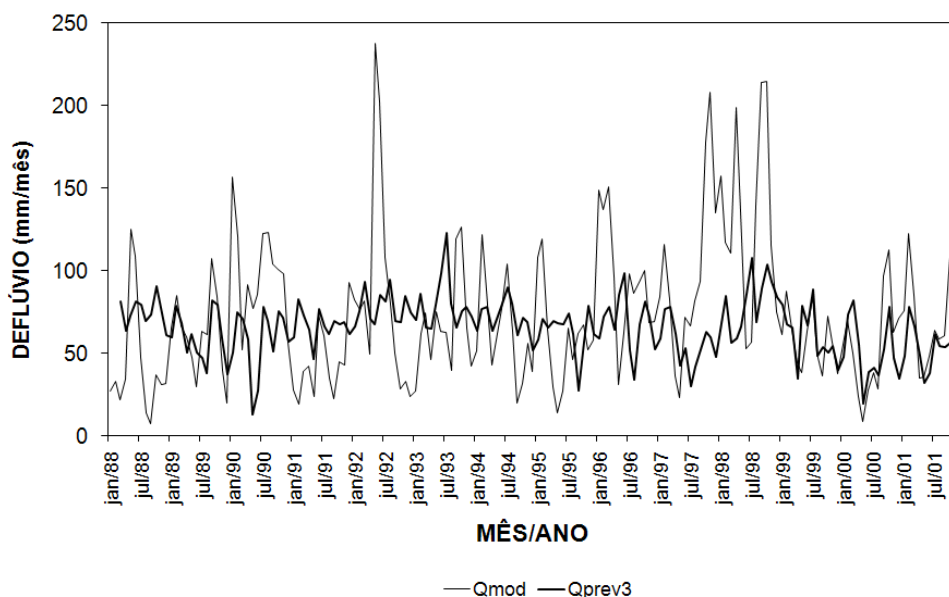


FIGURA 4.60 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MODELADAS E PREVISTAS COM HORIZONTE DE PREVISÃO DE 3 MESES EM FOZ DO AREIA

Os coeficientes de correlação entre as vazões modeladas e previstas (tabela 4.19) foram maiores que os coeficientes de correlação entre vazões observadas e previstas (tabela 4.18), conforme esperado. Entretanto, as vazões previstas, quando comparadas com as vazões provenientes da chuva perfeita, ainda apresentam dificuldade em reproduzir a grande quantidade de picos e estiagens do hidrograma de vazão modelada.

4.3.6.2 *Análise das previsões de chuva e vazão condicionada aos extremos do regime anual*

A bacia incremental do aproveitamento de Foz do Areia não possui sazonalidade definida. Por esta razão, ao avaliar-se as previsões de chuva e vazão com relação aos extremos (valores abaixo do percentil de 20% e acima do percentil de 80%), considera-se o regime anual por completo, e não apenas a estação chuvosa, como nos casos de Furnas e Emborcação.

A figura 4.61 apresenta o gráfico de correlação entre anomalias previstas e observadas de chuva para a bacia incremental de Foz do Areia, obedecendo às condições apresentadas na seção 4.1.5.2. A partir desse gráfico, são calculadas as taxas de acerto e erro.

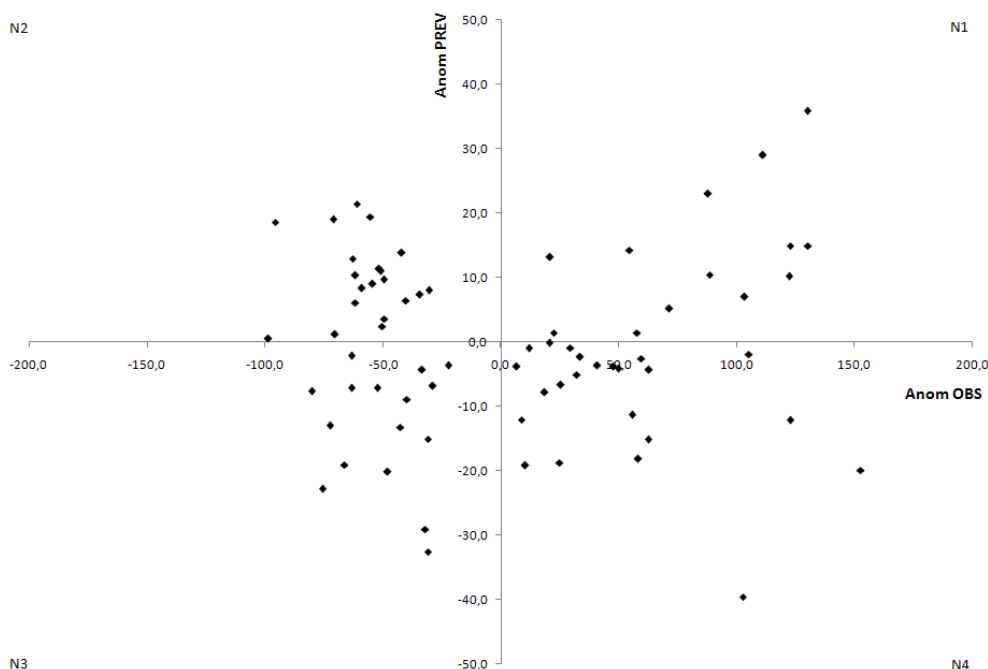


FIGURA 4.61 – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIAS OBSERVADAS E PREVISTAS DE CHUVA EM FOZ DO AREIA

As taxas de acerto e erro são calculadas através da contagem de pontos existentes nos quadrantes. A tabela 4.20 apresenta os valores necessários para calcular essas taxas para a bacia incremental de Foz do Areia.

TABELA 4.20 – NÚMERO DE CASOS EXISTENTES NOS QUADRANTES N1 A N4 NO GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DE PREVISÃO DE CHUVA PARA FOZ DO AREIA

Caso	Número de casos	Observação
$Anom_{obs} > 0 \cap Anom_{prev} > 0$	13	Quadrante N1
$Anom_{obs} < 0 \cap Anom_{prev} > 0$	20	Quadrante N2
$Anom_{obs} < 0 \cap Anom_{prev} < 0$	16	Quadrante N3
$Anom_{obs} > 0 \cap Anom_{prev} < 0$	23	Quadrante N4

As taxas de acerto e erro da previsão de chuva calculadas para a bacia de Foz do Areia são:

Taxa de acerto: 40%

Taxa de erro: 60%

Para avaliar as vazões previstas para o horizonte de 1 mês, são utilizados os mesmos condicionantes impostos para a análise da previsão de chuvas. Desse modo, através da frequência acumulada das vazões observadas, calculam-se as vazões V_{20} e V_{80} (vazões correspondentes aos percentis de 20% e 80%, respectivamente) para o período anual total, retiram-se os meses das séries de dados referentes às vazões observadas que se encontraram

entre V_{20} e V_{80} , calculam-se as anomalias observadas e previstas de vazão e constrói-se um gráfico de correlação, o qual é apresentado na figura 4.62:

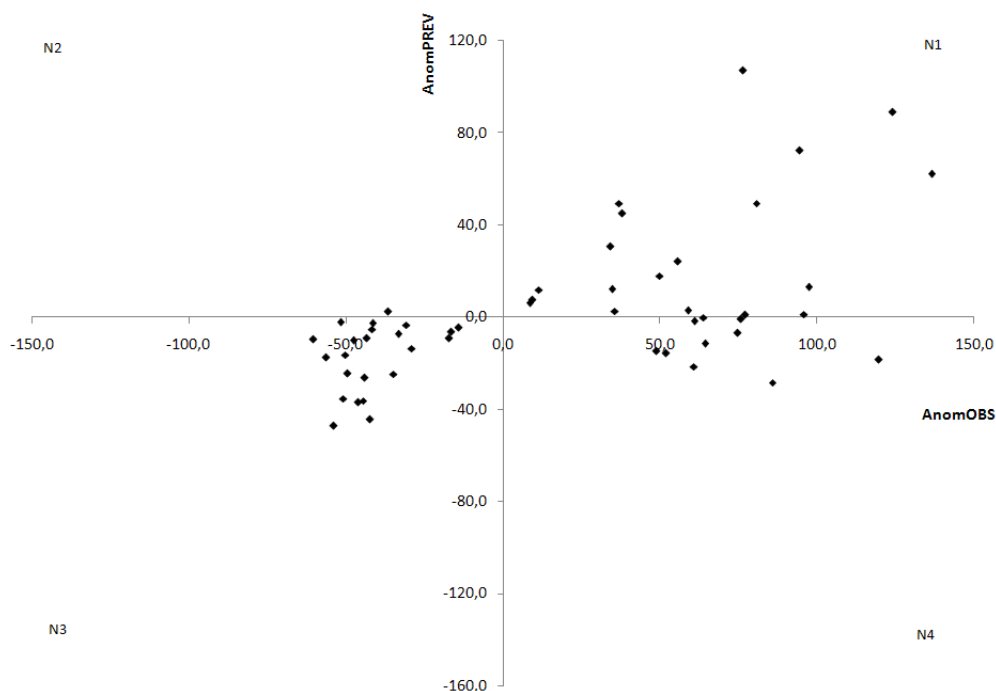


FIGURA 4.62 – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE ANOMALIAS OBSERVADAS E PREVISTAS DE VAZÃO EM FOZ DO AREIA

A tabela 4.21 apresenta a contagem de pontos em cada quadrante do gráfico de correlação, necessária para calcular a taxa de acerto e a taxa de erro na previsão de vazão com horizonte de um mês para a bacia incremental de Foz do Areia.

TABELA 4.21 – NÚMERO DE CASOS EXISTENTES NOS QUADRANTES N1 A N4 NO GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DE PREVISÃO DE VAZÃO PARA FOZ DO AREIA

Caso	Número de casos	Observação
$Anom_{obs} > 0 \cap Anom_{prev} > 0$	19	Quadrante N1
$Anom_{obs} < 0 \cap Anom_{prev} > 0$	1	Quadrante N2
$Anom_{obs} < 0 \cap Anom_{prev} < 0$	22	Quadrante N3
$Anom_{obs} > 0 \cap Anom_{prev} < 0$	10	Quadrante N4

Taxa de acerto: 79%

Taxa de erro: 21%

Embora as vazões previstas para o aproveitamento de Foz do Areia subestimem as vazões observadas, a taxa de acerto dessa previsão foi bastante elevada, ou seja, a ocorrência das grandes anomalias de vazão foram previstas corretamente em 79% dos casos, mas as suas intensidades foram significativamente subestimadas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo desse estudo foi verificar se a previsão integrada sazonal de chuva do projeto EUROBRISA (versão 2007) é adequada para produzir previsões de vazões com resolução mensal e horizonte de três meses que sejam úteis para a otimização da geração hidrelétrica e controle de cheias. A estratégia para o atendimento desse objetivo foi aplicar um modelo chuva-vazão-propagação concentrado (3R) para grandes bacias, com resolução mensal e parâmetros calibrados com dados de chuva observada.

Os dados de previsão mensal de chuva foram obtidos através da desagregação das previsões integradas sazonais de chuva do projeto EUROBRISA, as quais se referem a trimestres e foram obtidas através da combinação entre dois modelos dinâmicos (ECMWF e UK Met Office) e um modelo estatístico. Foi considerado que a previsão mensal é igual à previsão do trimestre em que o mês em questão é o primeiro do trimestre. Essa desagregação mostrou-se compatível com os propósitos desse trabalho, porque as previsões sazonais apresentavam as mesmas características da chuva observada na escala mensal. Para as bacias do Sudeste, a previsão de chuva representou adequadamente as chuvas observadas, embora tenha apresentado dificuldade em reproduzir alguns valores extremos. Na bacia do Sul, a previsão de chuva variou proximamente à média da chuva observada e não representou adequadamente a grande variação da chuva observada.

As conclusões gerais desse estudo estão relacionadas com as questões: (1) se as previsões de chuva sazonal já são úteis para o sistema hidrelétrico Brasileiro; e (2) qual é o procedimento recomendado para transformar a previsão de chuva sazonal em previsão de aflúências naturais aos reservatórios.

Em relação à utilidade da previsão sazonal de chuva para o sistema hidrelétrico Brasileiro, foram examinados dois casos na região Sudeste (bacias do Grande e Paranaíba) e um caso na região Sul (bacia do Iguaçu). Para os aproveitamentos na região Sudeste há um grande potencial de ganho na previsão das vazões mensais com horizonte de três meses, uma vez que tanto as vazões mensais como os volumes afluentes previstos desde o início até o final da estação chuvosa tiveram uma elevada correlação com os valores observados (da ordem de 80%). Tanto o início de subida do hidrograma quanto a magnitude das vazões de pico foram adequadamente previstas para a região Sudeste. No caso da região Sul, foi analisado o aproveitamento hidrelétrico de Foz do Areia no Rio Iguaçu. Os rios da região Sul

são caracterizados por pequena variabilidade sazonal e grande variabilidade interanual, sendo que as previsões de vazão tiveram bom desempenho em relação à fase das grandes anomalias (secas e úmidas), mas subestimaram grosseiramente a magnitude das mesmas. Portanto, as previsões sazonais de chuva ainda não são adequadas para prever os volumes afluentes aos reservatórios da região Sul.

Em relação ao procedimento para produzir previsões de vazões mensais a partir das previsões sazonais de chuva, esse estudo identificou os principais elementos para atingir este objetivo, que são: (1) estimativa das séries e das estatísticas temporais da chuva média na bacia a partir de medições locais (pluviômetros); (2) calibração de modelo chuva-vazão, usando como dado de entrada a chuva média na bacia, a partir das medições de pluviômetros, e séries de vazões naturais; (3) previsões de chuva compostas a partir das estatísticas das chuvas de pluviômetros e das previsões da chuva sazonal e seu desvio padrão.

O uso de chuvas estimadas em pontos de grade (GPCP) para a calibração do modelo hidrológico produziu estimativas de vazão com baixo índice de acerto, uma vez que a chuva do GPCP subestima a magnitude na estação chuvosa e superestima no período seco da região Sudeste. No caso da região Sul também há grandes diferenças entre as séries de chuvas do GPCP e as observadas localmente nos pluviômetros.

O acoplamento de um procedimento para atualização de estados ao modelo hidrológico não produziu melhoras significativas na estimativa/previsão de vazões. Portanto, excluiu-se o modelo para atualização de estados do procedimento de previsão de vazões. É provável que o baixo desempenho do atualizador de estado se deva ao fato de que a estrutura de erros entre as vazões observadas e previstas não é aleatória, mas é caracterizada por vieses bem definidos, por exemplo, subestima as vazões altas. A formulação do estimador de estado utilizado se baseia na hipótese de que os erros sejam normalmente distribuídos e isentos de viés.

As conclusões associadas aos casos simulados especificamente para a região Sudeste estão associadas ao reconhecimento dos fatores que possivelmente contribuíram para esses bons resultados:

- ciclo anual bem definido entre estações úmidas e secas, estando o período chuvoso compreendido entre setembro e março e o período seco entre abril e agosto;
- o elevado índice de acerto das previsões de anomalias de chuva, associadas ao uso da média de longo termo da chuva mensal obtida através de pluviômetros, produziram previsões de vazão com grande acurácia;
- grandes reservatórios dos aproveitamentos de Furnas e Emborcação, que possuem

índice de armazenamento superior a 200 dias. Nos casos de grandes reservatórios, mesmo se as previsões de picos de vazões estiverem defasados de um mês, ainda assim haverá grande utilidade na previsão do volume afluente ao reservatório durante o horizonte de 3 meses.

Na região Sul, que se caracteriza por apresentar uma distribuição de chuvas quase uniforme, mas com grande variabilidade interanual, destaca-se que:

- o reservatório de Foz do Areia possui pequeno volume útil, acarretando em menor índice de armazenamento (aproximadamente 70 dias). Embora a previsão sazonal de chuva tenda a acertar a fase, ela atenua fortemente a intensidade da chuva prevista e consequentemente da vazão. Desse modo, o volume afluente ao reservatório durante os três meses de previsão é fortemente subestimado durante os eventos úmidos e fortemente superestimado durante os eventos secos;

- todavia, para a região Sul, ainda é promissor o fato de que a previsão das grandes anomalias de vazão tem um índice de acerto de 79%, mas com grande atenuação na intensidade das anomalias. Portanto recomenda-se que se estendam os estudos para que se desenvolva um procedimento para “corrigir” a magnitude das grandes anomalias de chuva.

Recomenda-se que se complemente este estudo com a análise da previsão de vazões para as bacias das regiões Norte e Nordeste, e que também se desenvolvam instrumentos para quantificar o eventual aumento da geração hidrelétrica em função da adoção deste sistema de previsão de vazões para todos os aproveitamentos do sistema hidrelétrico Brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, R.F.; HUFFMAN, G.J.; CHANG, A.; FERRARO, R.; XIE, P.; JANOWIAK, J.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U.; CURTIS, S.; BOLVIN, D.; GRUBER, A.; SUSSKIND, J.; ARKIN, P. The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). **Journal of Hydrometeorology**., v. 4, p. 1147- 1167, 2003.

ANDERSON, D.; STOCKDALE, T.; BALMASEDA, M.; FERRANTI, L.; VITART, F.; MOLTENI, F.; DOBLAS-REYES, F.; MOGENSEN, K.; VIDARD, A. **Development of the ECMWF seasonal forecast System 3**. ECMWF Technical Memorandum 503, 2007. Disponível em < http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/_pdf/tm/501-600/tm503.pdf>. Acesso em: 29/9/2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Inventário Estações Pluviométricas por Bacia Hidrográfica**. Brasília, 2001.

BRÁS, R.L.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I. **Random functions and hydrology**. Addison-Wesley, EUA, 559 f., 1990.

BURNASH, R.J.C.; FERRAL, R.L.; MCGUIRE, R.A. **A generalized streamflow simulation system-conceptual modeling for digital computers**. NOAA, NWS and state of California Department of Water Resources, Joint Federal-State River Forecast Center, Sacramento, California, 1973. 204 f. Technical Report.

BRAHAMANANDA RAO, V.; SANTO, C.E.; FRANCHITO, S.H. **Informações climatológicas sobre a região**. Disponível em: <<http://energia1.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 29/11/2010.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS - CPTEC. **EUROBRISA – A EURO-BRazilian Initiative for Improving South American Seasonal Forecasts**. Disponível em: <<http://eurobrisa.cptec.inpe.br/>> Acesso em: 01/10/2009.

CEPEL. **Modelo GEVAZP - Manual de Referência**. 2001a.

CEPEL. **Modelo NEWAVE - Manual de Referência, versão 9.2**. 2001b.

CEPEL. **Modelo DECOMP - Manual de Referência, versão 12.0**. 2004.

CEPEL. **Especificação Funcional Modelo Newave**. 44 f. 2000.

COELHO, C.A.S.; STEPHENSON, D.B.; DOBLAS-REYES, F.J.; BALMASEDA, M.; GUETTER, A.K. Assimilação Bayesiana de Previsões Climáticas de Chuva para a Escala da Bacia. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, João Pessoa, 2005.

COELHO, C.A.S. **Forecast calibration and combination: Bayesian assimilation of seasonal climate predictions**. 178 f. Tese Ph D. – Department of Meteorology, University of Reading, Reading, 2005.

COELHO, C.A.S.; STEPHENSON, D.B.; BALMASEDA, M.; DOBLAS-REYES, F.J. ; VAN OLDENBORGH, G.J. Towards an integrated seasonal forecasting system for South America. **Journal of Climate**, v. 19, p. 3704-3721, 2006.

GELB, A. **Applied optimal estimation**. MIT Press, Cambridge, EUA, 1974.

GEORGAKAKOS, K.P.; RAJARAM, H.; LI, S.G. **On improved operational hydrologic forecasting of streamflows**. Iowa, EUA: 1988. 162 f. IIHR Report n. 325.

GEORGAKAKOS, K.P.; SEO, D.J.; GUPTA, H.; SCHAAKE, J.; BUTTS, M.B. Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty through multimodel ensembles. **Journal of Hydrology**, v. 298, p. 222-241, 2004.

GRAHAM, R.J.; GORDON, M.; MCLEAN, P.J.; INESON, S.; HUDDLESTON, M.R.; DAVEY, M.K.; BROOKSHAW, A.; BARNES, R.T.H. A performance comparison of coupled and uncoupled versions of the Met Office seasonal prediction General Circulation Model. **Tellus 57A**, p. 320-339, 2005.

GUETTER, A.K.; GEORGAKAKOS, K.P.; SMITH, G.F. On improved operational hydrologic forecasting: results from WMO Real-Time Forecasting Experiment. **Journal of Hydrology**, v. 114, p. 17-45, 1990.

GUETTER, A.K.; GEORGAKAKOS, K.P.; TSONIS, A.A. Hydrologic applications of satellite data: 2. Flow simulation and soil water estimates. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D21, p. 26527 – 26538, 1996.

GUETTER, A.K.; GEORGAKAKOS, K.P. Uncertainty in the prediction of streamflow by real-time prediction models using satellite rainfall estimates. In: PREPRINTS 13TH CONFERENCE ON HYDROLOGY, 77th AMS Annual Meeting, Long Beach, EUA. p. J109 - J112, 2-7 fev. 1997.

GUETTER, A.K. Balanço hídrico mensal e estimativa da água no solo para a Bacia do Alto Iguaçu. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1997, Vitória.

GUETTER, A.K. **SelecaoBacias.doc**. Curitiba, 29 set. 2009. Microsoft Office Word 2003.

HIDROWEB. Agência Nacional de Águas. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em 04/3/2010.

KRAUSKOPF NETO, R.; GUETTER, A.K.; MINE, M.R.M. Modelo Hidrológico com Atualização de Estado Parte I: Modelagem Hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 93-103, 2007a.

KRAUSKOPF NETO, R.; GUETTER, A.K.; MINE, M.R.M. Modelo Hidrológico com Atualização de Estado Parte II: Estimador de Estado Dinâmico-Estocástico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 105-115, 2007b.

MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; CASTRO, C.A.C.; MENDES, D. **Início da estação chuvosa nas regiões SE/CO/S do NE do Brasil, afetadas pela crise de energia**. Disponível em: <<http://energia1.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 29/11/2010.

ONS. **Relatório de Atividades da Supervisão de Hidrologia**. Rio de Janeiro, 2002. 29 p.

ONS. **CPINS – Cálculo e Previsão de Vazões Incrementais e Naturais a Sobradinho – Manual do Usuário**. 2003.

ONS. **O Sistema Interligado Nacional e os Modelos para o Planejamento da Operação Energética**. 31 f., set. 2005a.

ONS. **Revisão das séries de vazões naturais nas principais bacias do SIN – Relatório Executivo**. Brasília, 2005b.

ONS. **Dados Relevantes 2007**. Rio de Janeiro, 2007.

ONS. **Atualização de séries históricas de vazões – período 1931 a 2007**. Rio de Janeiro, 2008.

PECK, E.L. **Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecast Systems**. NWS HYDRO-31. NOAA, NWS, Office of Hydrology, Silver Springs, Maryland, EUA, 1976.

PRESS, W.H.; FLANNERY, B.P.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T. **Numerical recipes: the art of scientific computing**. Cambridge University Press, EUA, 818 f., 1986.

SEMINÁRIO DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DO ONS, 1, 2004, Rio de Janeiro. **Previsões Hidrometeorológicas e de Carga – Texto Provocativo para as discussões do tema 2**.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **Balanços Hídricos Climatológicos do Brasil**. Esalq (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz)/USP. Piracicaba, São Paulo, 1999. 1 CD-ROM

SÉRIE DE VAZÕES NATURAIS MÉDIAS MENSAIS. Rio de Janeiro: ONS, 1931 – 2007. Disponível em < http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx >. Acesso em: 01/10/2009.

SOFTWARE R. **The R Project for Statistical Computing**. Disponível em: < <http://www.r-project.org> > Acesso em: 10/11/2009.

STEPHENSON, D.B.; COELHO, C.A.S.; DOBLAS-REYES, F.J.; BALMASEDA, B. Forecast Assimilation: A unified framework for the combination of multi-model weather and climate predictions. **Tellus 57A**, p. 253-264, 2005.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104 p. 1955.

VENABLES, W.N.; SMITH, D.M.; R DEVELOPMENT CORE TEAM. **An Introduction to R**. Versão 1.9.1, 2004.

GLOSSÁRIO

Aproveitamento hidrelétrico: conjunto de todas as obras e equipamentos destinados à produção de energia elétrica utilizando-se de um potencial hidráulico. Sinônimo para usina hidrelétrica.

Aquífero: reservatório de água subterrânea.

Área de drenagem: área que se refere a um rio, medida no plano horizontal, limitada por divisões topográficas a partir das quais a água proveniente da chuva escoar sobre a superfície por gravidade até o rio.

Área incremental: área de drenagem entre duas seções do mesmo rio (por exemplo, a área de drenagem existente entre duas usinas hidrelétricas situadas no mesmo rio).

Bacia hidrográfica: área em que o escoamento superficial é recolhido por sumidouros ou lagos não ligados por canais superficiais a outros cursos d'água da bacia.

Deflúvio: razão entre vazão e área de drenagem.

Escoamento de base: parte da descarga que atinge o canal de um rio como água subterrânea. É o escoamento observado na exutória de uma bacia de drenagem durante os períodos longos em que não ocorre precipitação nem fusão de neves.

Estação pluviométrica: estação que possui um pluviômetro instalado e em funcionamento, a partir do qual são registrados dados de chuva observada.

Exutória: ponto mais baixo no limite de um sistema de drenagem, representa a saída da bacia hidrográfica. Sinônimo para foz e desembocadura.

Geração hidrelétrica: geração de energia elétrica a partir de matriz hidrelétrica (aproveitamentos hidrelétricos).

MLT: média de longo termo, refere-se à média da vazão observada em uma série histórica de vazões.

Modelo chuva-vazão: modelo hidrológico que calcula a vazão de uma bacia a partir da chuva.

Modelo de atualização de estados: modelo que atualiza o estado e a matriz de covariâncias dos erros do estado a partir da assimilação em tempo real de dados observados e comparação destes com os dados calculados pelo modelo hidrológico a partir dos dados de entrada (chuva e evapotranspiração potencial).

Modelo hidrológico: modelo que representa o comportamento de uma bacia

hidrográfica usado para avaliar como a chuva contribui para a vazão em cursos d'água.

Nascente: ponto no solo ou numa rocha de onde a água flui naturalmente para a superfície do terreno ou para uma massa de água.

Uso consuntivo: compreende as atividades em que o uso da água provoca uma diminuição de recursos hídricos, como o consumo industrial, consumo doméstico, irrigação e abastecimento de água.

Vazão afluente: vazão que chega a um aproveitamento hidrelétrico e que é influenciada pelas obras de regularização e demais ações antrópicas porventura existentes na bacia hidrográfica.

Vazão defluente: vazão total que sai de uma estrutura hidráulica. Corresponde à soma das vazões turbinadas e vertida em uma usina hidrelétrica.

Vazão incremental: vazão proveniente da diferença das vazões naturais entre duas seções determinadas de um curso d'água.

Vazão natural: vazão que ocorreria em uma seção do rio se não houvesse ações antrópicas na sua bacia contribuinte. A vazão natural é calculada a partir de séries de vazões observadas em estações fluviométricas e das vazões afluentes e defluentes nos locais de aproveitamentos, retirando-se o efeito da operação dos reservatórios existentes a montante e incorporando as vazões relativas aos usos consuntivos e à evaporação líquida.

ANEXOS

ANEXO 1 – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS.....	138
ANEXO 2 – ROTINA FORTRAN DADOS PLUVIOMÉTRICOS (PLUDIA.F)	142
ANEXO 3 – ROTINA FORTRAN DADOS DE VAZÃO NATURAL (FLUMES.F)	148
ANEXO 4 – ROTINA FORTRAN DADOS EVAPOTRANSPIRAÇÃO (PETFURNAS.F).....	151
ANEXO 5 – ROTINA FORTRAN DE BALANÇO HÍDRICO MENSAL (BALMES.F)	153

ANEXO 1 – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS

As tabelas a seguir listam os postos pluviométricos existentes na bacia incremental de cada aproveitamento hidrelétrico selecionado. Esses postos foram escolhidos de acordo com suas coordenadas e as coordenadas da área de drenagem incremental. No item 3.2.5 explica-se como foi representada a área incremental de cada usina e quais são suas coordenadas. Os postos pluviométricos devem se situar dentro das áreas incrementais.

TABELA A.1 – POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SITUADOS DENTRO DA ÁREA DE DRENAGEM INCREMENTAL DO APROVEITAMENTO DE FURNAS

Nome aproveitamento	Nome posto	Código	Latitude	Longitude	Início
Furnas	Carandai	02043018	-20°57'21"	-43°48'03"	07/1941
	Oliveira 83637	02044001	-20°41'00"	-44°49'00"	07/1913
	Santana do Jacaré	02045004	-20°54'18"	-45°07'30"	03/1941
	Itaú de Minas	02046001	-20°44'20"	-46°44'05"	10/1939
	Delfinópolis	02046009	-20°20'52"	-46°50'45"	09/1941
	São Sebastião do Paraíso 83631	02046020	-20°54'00"	-46°59'00"	04/1945
	Campolide	02143005	-21°16'44"	-43°49'12"	04/1941
	Barroso	02143006	-21°11'14"	-43°58'48"	05/1941
	Vargem do Engenho	02143007	-21°11'34"	-43°36'50"	05/1941
	Ibertioga	02143008	-21°25'38"	-43°57'34"	05/1941
	Usina Barbacena	02143009	-21°16'29"	-43°52'43"	07/1941
	Barbacena 83689	02143055	-21°15'00"	-43°46'00"	06/1941
	Bom Sucesso	02144000	-21°02'02"	-44°46'19"	07/1940
	Bom Jardim de Minas	02144001	-21°56'52"	-44°11'37"	12/1940
	Porto Tiradentes	02144002	-21°07'21"	-44°31'57"	01/1941
	Caxambu	02144003	-21°59'23"	-44°56'19"	01/1941
	Baependi	02144004	-21°57'08"	-44°52'50"	02/1941
	Itumirim	02144005	-21°19'15"	-44°52'22"	02/1941
	Luminárias	02144006	-21°30'25"	-44°54'56"	02/1941
	Madre de Deus de Minas	02144007	-21°29'32"	-44°19'34"	03/1941
	Porto do Elvas	02144009	-21°09'54"	-44°08'08"	05/1941
	São Vicente de Minas	02144010	-21°42'01"	-44°26'20"	08/1941
	Tabuão	02144016	-21°59'14"	-44°01'56"	02/1942
	Aiuruoca	02144018	-21°58'38"	-44°36'12"	03/1943
	Andrelândia	02144019	-21°44'07"	-44°18'47"	07/1948
	São João Del Rei 83688	02144032	-21°08'00"	-44°16'00"	01/1915
	Caxambu 83686	02144036	-21°59'00"	-44°57'00"	12/1911
	Conceição do Rio Verde	02145001	-21°53'14"	-45°04'45"	12/1940
	Três Corações	02145003	-21°43'15"	-45°15'52"	01/1941
	Usina Couro do Cervo	02145007	-21°20'37"	-45°10'13"	02/1941
	Fazenda Juca Casimiro	02145008	-21°52'11"	-45°15'45"	03/1941
	Usina do Chicão	02145009	-21°55'09"	-45°28'44"	03/1941
Monsenhor Paulo	02145017	-21°45'37"	-45°32'16"	07/1942	
Paraguaçu	02145022	-21°35'07"	-45°40'26"	09/1941	
Cambuquira 83685	02145034	-21°51'00"	-45°18'00"	07/1926	
Lavras 83687	02145036	-21°14'00"	-45°00'00"	02/1911	
Fazenda Açude	02146003	-21°26'00"	-46°51'00"	04/1940	

Nome aproveitamento	Nome posto	Código	Latitude	Longitude	Início
	Itaiquara	02146004	-21°28'00"	-46°49'00"	04/1940
	Caconde	02146007	-21°32'00"	-46°38'00"	10/1937
	São José do Rio Pardo	02146009	-21°36'00"	-46°54'00"	12/1942
	São Sebastião da Gramma	02146010	-21°42'00"	-46°49'00"	11/1936
	Vargem Grande do Sul	02146011	-21°50'00"	-46°54'00"	08/1936
	São João da Boa Vista	02146013	-21°59'05"	-46°47'43"	04/1944
	São João da Boa Vista	02146014	-21°57'00"	-46°48'00"	05/1943
	Fazenda Guaxupe	02146015	-21°32'00"	-46°48'00"	04/1940
	Muzambinho	02146030	-21°22'50"	-46°31'08"	04/1941
	Poços de Caldas 83681	02146048	-21°47'00"	-46°33'00"	03/1921
	Usina Congonhal	02244054	-22°07'16"	-44°50'33"	11/1940
	Ponte do Costa	02244057	-22°07'40"	-44°24'30"	12/1940
	Pedreira (PACAU)	02244064	-22°01'35"	-44°10'25"	01/1942
	Alagoa	02244065	-22°10'12"	-44°38'13"	05/1942
	Passa Quatro 83737	02244095	-22°23'00"	-44°58'00"	07/1912
	Santa Rita do Sapucaí	02245000	-22°15'05"	-45°42'32"	11/1940
	Fazenda da Guarda (Parque)	02245010	-22°41'20"	-45°28'53"	09/1934
	São Bento do Sapucaí	02245011	-22°41'09"	-45°44'07"	04/1937
	Vila Capivari	02245018	-22°43'00"	-45°34'00"	12/1936
	Usina do Fojo	02245022	-22°43'00"	-45°32'00"	03/1937
	Zé da Rosa	02245029	-22°46'00"	-45°42'00"	03/1943
	Delfim Moreira	02245064	-22°30'35"	-45°17'12"	01/1941
	Cristina	02245065	-22°12'37"	-45°15'57"	01/1941
	Conceição dos Ouros	02245066	-22°24'51"	-45°47'27"	01/1941
	Brasópolis	02245070	-22°28'17"	-45°37'19"	01/1941
	Careaçu	02245074	-22°03'14"	-45°41'58"	04/1941
	Pouso Alegre	02245077	-22°14'08"	-45°56'01"	07/1941
	Virgínia	02245080	-22°20'17"	-45°05'26"	10/1941
	Silvianópolis	02245089	-22°02'04"	-45°50'03"	08/1941
	Rio Preto	02245103	-22°49'00"	-45°44'00"	03/1943
	Campos de Jordão 83705	02245105	-22°44'00"	-45°35'00"	01/1932
	São Lourenço 83736	02245107	-22°06'00"	-45°01'00"	02/1922
	Aguai	02246002	-22°03'00"	-46°58'00"	08/1939
	Usina Pinhal (Eloy Chaves)	02246007	-22°17'00"	-46°46'00"	09/1931
	Eleutério	02246008	-22°20'00"	-46°43'00"	11/1942
	Horto Florestal	02246012	-22°27'00"	-46°57'00"	01/1941
	Itapira	02246013	-22°27'00"	-46°49'00"	11/1936
	Lindóia	02246016	-22°31'00"	-46°39'00"	11/1936
	Socorro	02246017	-22°36'00"	-46°32'00"	11/1942
	Serra Negra	02246019	-22°36'00"	-46°42'00"	11/1936
	Pinhal 83731	02246039	-22°10'00"	-46°43'00"	01/1906
	Beira de Santa Rita	02246047	-22°01'24"	-46°18'14"	08/1942
	Ouro Fino 83732	02246048	-22°17'00"	-46°22'00"	03/1914
	Cambuí (CSME)	02246050	-22°36'26"	-46°02'31"	07/1941
	Jacutinga	02246052	-22°17'19"	-46°37'09"	09/1941
	Mogi-Mirim	02246104	-22°26'00"	-46°58'00"	09/1936
	Salesópolis	02345047	-23°32'00"	-45°51'00"	06/1946
	Casa Grande	02345076	-23°38'04"	-45°57'39"	04/1945
	Casa Grande 83808	02345099	-23°38'00"	-45°55'00"	02/1931
	Itatiba	02346001	-23°01'00"	-46°50'00"	10/1939
	Baixo Cotia	02346002	-23°33'00"	-46°52'00"	01/1937
	Vinhedo	02346003	-23°02'00"	-46°58'00"	09/1936
	Piracaia	02346004	-23°03'00"	-46°21'00"	08/1942
	Nazaré Paulista	02346010	-23°11'00"	-46°24'00"	06/1946
	Jundiá (CPEF)	02346013	-23°11'00"	-46°52'00"	01/1936

FONTE: ANEEL (2001)

TABELA A.2 – POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SITUADOS DENTRO DA ÁREA DE DRENAGEM INCREMENTAL DO APROVEITAMENTO DE EMBORCAÇÃO

Nome aproveitamento	Nome posto	Código	Latitude	Longitude	Início
Emborcação	Vianópolis	01648002	-16°44'47"	-48°31'29"	09/1944
	Carmo do Paranaíba	01846001	-19°00'12"	-46°18'22"	11/1941
	Patos de Minas 83531 (PCD)	01846018	-18°36'00"	-46°31'00"	10/1947
	Monte Carmelo	01847000	-18°43'14"	-47°31'28"	11/1941
	Estrela do Sul	01847001	-18°44'17"	-47°41'24"	05/1944
	Abadia dos Dourados	01847003	-18°29'28"	-47°24'23"	06/1946
	Catalão	01847004	-18°10'13"	-47°57'27"	10/1913
	Monte Alegre de Minas	01848000	-18°52'20"	-48°52'10"	01/1941
	Ibia	01946004	-19°28'30"	-46°32'31"	09/1944
	Salitre	01946005	-19°04'14"	-46°47'45"	09/1944
	Araxá 83579	01946015	-19°34'00"	-46°56'00"	09/1916
	Santa Juliana	01947001	-19°18'57"	-47°31'34"	09/1941
	Barreiro do Araxá 305	01947015	-19°32'00"	-47°00'00"	06/1925
	Itaú de Minas	02046001	-20°44'20"	-46°44'05"	10/1939
	Delfinópolis	02046009	-20°20'52"	-46°50'45"	09/1941
	São Sebastião do Paraíso 83631	02046020	-20°54'00"	-46°59'00"	04/1945
	Igarapava	02047002	-20°02'00"	-47°45'00"	05/1942
	Rifaina	02047005	-20°05'00"	-47°26'00"	05/1943
	Buritizal	02047008	-20°11'00"	-47°43'00"	09/1931
	Fazenda Santa Jacinta	02047009	-20°13'00"	-47°54'00"	01/1945
	Pedregulho	02047010	-20°15'00"	-47°29'00"	03/1943
	Franca	02047017	-20°31'00"	-47°24'00"	05/1935
	Fazenda Santa Cecília	02047018	-20°31'00"	-47°58'00"	08/1937
	Usina Dourados (CPFL) B4-003	02047021	-20°39'00"	-47°41'00"	09/1931
	Orlandia	02047025	-20°44'00"	-47°53'00"	05/1937
	Fazenda Conquista	02047027	-20°48'00"	-47°46'00"	09/1940
	Usina Esmeril (CPFL) B4-005	02047028	-20°50'00"	-47°18'00"	01/1931
	Batatais	02047029	-20°53'00"	-47°37'00"	04/1943
	Franca 83630	02047034	-20°33'00"	-47°26'00"	01/1911
	Restinga	02047057	-20°36'00"	-47°29'00"	09/1939
	São José da Bela Vista	02047058	-20°36'00"	-47°38'00"	09/1939
	Ribeirão Corrente	02047059	-20°28'00"	-47°36'00"	11/1939
	Cristais Paulista	02047060	-20°24'00"	-47°24'00"	09/1939
	Caninde	02047065	-20°10'00"	-47°50'00"	05/1942
	Ituverava	02047067	-20°20'00"	-47°46'00"	01/1943
	Guará	02047068	-20°25'00"	-47°49'00"	05/1943
	Fazenda Campestre (IAA)	02047091	-20°01'00"	-47°51'00"	05/1942
	Fazenda São Domingos	02048004	-20°12'38"	-48°17'26"	05/1938
	Ponte Joaquim Justino	02048011	-20°27'13"	-48°27'03"	07/1937
	Ribeirão dos Santos	02048014	-20°36'00"	-48°59'00"	05/1943
	Barretos	02048015	-20°34'00"	-48°34'00"	01/1936
	Ibitu	02048016	-20°37'00"	-48°46'00"	07/1946
Jaborandi	02048019	-20°41'00"	-48°25'00"	05/1941	
Colina	02048021	-20°44'00"	-48°33'00"	11/1938	
Tamanduá	02048022	-20°43'00"	-48°56'00"	02/1943	
Morro Agudo	02048023	-20°44'00"	-48°03'00"	08/1940	
Fazenda Marambaia	02048027	-20°49'00"	-48°29'00"	12/1940	
Monte Verde Paulista	02048029	-20°51'00"	-48°48'00"	02/1943	
Monte Azul Paulista	02048032	-20°54'00"	-48°38'00"	02/1943	
Desengano	02048033	-20°59'57"	-48°01'28"	07/1937	

Nome aproveitamento	Nome posto	Código	Latitude	Longitude	Início
	Botafogo (CPEF)	02048034	-20°59'59"	-48°33'00"	02/1943
	Novais	02048035	-20°59'00"	-48°55'00"	08/1936
	Barretos 83625	02048036	-20°33'00"	-48°34'00"	07/1943
	Barretos 224	02048037	-20°33'00"	-48°34'00"	06/1943
	Colina (IAC) 83626	02048038	-20°43'00"	-48°33'00"	10/1940
	Bebedouro 83627	02048038	-20°57'00"	-48°29'00"	02/1940
	Oimpia	02048047	-20°44'00"	-48°54'00"	12/1938
	Ibitiuva	02048065	-20°59'00"	-48°20'00"	12/1940
	Fazenda Palmeiras	02048087	-20°35'00"	-48°22'00"	07/1943

FONTE: ANEEL (2001)

TABELA A.3 – POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SITUADOS DENTRO DA ÁREA DE DRENAGEM INCREMENTAL DO APROVEITAMENTO DE FOZ DO AREIA

Nome aproveitamento	Nome posto	Código	Latitude	Longitude	Início
Foz do Areia	São Bento	02549000	-25°56'00"	-49°47'00"	04/1938
	Porto Amazonas (PCD)	02549001	-25°33'00"	-49°53'00"	09/1939
	Rio da Várzea dos Lima	02549003	-25°57'00"	-49°23'00"	09/1940
	Engenheiro Bley (RVPSC)	02549013	-25°38'00"	-49°45'00"	04/1943
	Curitiba (Afonso Pena)	02549029	-25°31'00"	-49°10'00"	09/1946
	Rio dos Patos	02550000	-25°12'00"	-50°56'00"	05/1937
	São Mateus do Sul	02550001	-25°52'00"	-50°23'00"	02/1938
	Santa Cruz	02550003	-25°12'00"	-50°09'00"	10/1945
	Rio Claro do Sul (Eufrozina)	02550005	-25°56'00"	-50°41'00"	05/1948
	Ivaí 83811	02550006	-25°01'00"	-50°51'00"	01/1912
	Mallet (RVPSC)	02550014	-25°53'00"	-50°50'00"	08/1939
	Santa Clara (PCD)	02551004	-25°38'00"	-51°58'00"	08/1949
	Guarapuava 83834	02551006	-25°24'00"	-51°28'00"	01/1910
	Rio Negro (PCD)	02649006	-26°06'00"	-49°48'00"	12/1922
	Rio Negro 83867	02649021	-26°06'00"	-49°48'00"	12/1922
	Irineópolis 83865	02650002	-26°15'00"	-50°48'00"	07/1922
	Marcílio Dias (RVPSC)	02650003	-26°06'00"	-50°23'00"	08/1939
	União da Vitória (PCD)	02651000	-26°14'00"	-51°04'00"	02/1938
	Jangada	02651003	-26°22'00"	-51°15'00"	11/1945
	Porto Vitória	02651004	-26°10'00"	-51°13'00"	11/1945
	Fazenda Maracanã	02651005	-26°02'00"	-51°09'00"	11/1945
	Palmas 83860	02651006	-26°29'00"	-51°59'00"	11/1922
	Matos Costa (RVPSC)	02651011	-26°29'00"	-51°10'00"	08/1939
	Divisa de Anitapolis	02749012	-27°59'47"	-49°06'53"	11/1945
	Lages 83891	02750005	-27°48'30"	-50°19'42"	11/1913
	Marcelino Ramos 83885	02751005	-27°27'00"	-51°55'00"	03/1916

FONTE: ANEEL (2001)

ANEXO 2 – ROTINA FORTRAN DADOS PLUVIOMÉTRICOS (PLUDIA.F)

```

c      *****
c      Este programa le os dados pluviometricos baixados do hidroweb,
c      as falhas foram preenchidas com o codigo -999.90
c
c      O programa é especifico para Furnas
c
c      Alexandre K. Guetter
c      UFPR 23/ABR/2010
c      *****
c
c      Os parametros sao:
c      nm=numero de meses em 1 ano
c      nds=numero maximo de dias em qualquer mes do ano
c      ibeg=ano inicial da serie
c      iend=ano final da serie
c      ns=numero de postos pluviometricos na bacia
c      ny=numero de anos da serie
c      codfal=codigo de falhas
c      plim=limite maximo da chuva diaria para mostrar na tela
c      nfal=numero maximo de falhas em um mes para nao usar codfal
c
c      parameter(nm=12,nds=31,ibeg=1942,iend=2004,ns=2)
c      parameter(ny=iend-ibeg+1)
c      parameter(codfal=-999.90,nfal=5)
c      parameter(plim=100.0)
c
c      declaracao das variaveis com caracter-----
c
c      character*80 adum
c
c      declaracao da dimensao dos vetores-----
c
c      nd(nm,ny)=numero de dias para um determinado mes/ano
c      iyr(ny)=ano; p.ex: iyr(1)=1942
c      p(nds,nm,ny,ns)=chuva di r ia para um certo dia/mes/ano/esta#Eo
c      pmaxy(iy,is)=chuva maxima diaria para cada ano/estacao
c      pmdb(nds,nm,ny)=chuva m,dia na bacia para um certo dia/mes/ano
c      pdum(ns)=vari vel temporaria, entrada para subrotina MOMENT
c      pm(nm,ny,ns)=total de chuva mensal para um certo mes/ano/esta#Eo
c      pmmb(nm,ny)=chuva m,dia mensal na bacia para um certo mes/ano
c      py(ny,ns)=total de chuva anual para um certo mes/ano/esta#Eo
c      pmyb(ny)=chuva m,dia anual na bacia para um certo ano
c      pclim(nm,ns)=climatologia da chuva mensal para um mes/esta#Eo
c      pclimb(nm)=climatologia da chuva m,dia na bacia
c
c      dimension nd(nm,ny), iyr(ny), p(nds,nm,ny,ns), pmdb(nds,nm,ny),
&          pmaxy(ny,ns),
&          pm(nm,ny,ns), pmmb(nm,ny),
&          py(ny,ns), pmyb(ny),
&          pclim(nm,ns), pclimb(nm), ndum(ns)
c
c      abrir os arquivos de entrada-----
c

```

```

open(10,file='PLU_Furnas_02045004.txt',status='old')
open(11,file='PLU_Furnas_02145007.txt',status='old')
c
c  abrir os arquivos de saida-----
c
open(20,file='plu_FURNAS_dia.txt')
open(21,file='plu_FURNAS_mes.txt')
open(22,file='plu_FURNAS_ano.txt')
open(23,file='plu_FURNAS_clim.txt')
open(24,file='plu_FURNAS_falha.txt')
open(25,file='plu_FURNAS_maxdia.txt')
c
c  write headers nos arquivos de saida-----
c
write(20,'(3a5,6a9)')'dia','mes','ano','MEDIA','posto1','posto2',
&  'posto3','posto4','posto5'
write(21,'(2a5,6a9)')'mes','ano','MEDIA','posto1','posto2',
&  'posto3','posto4','posto5'
write(22,'(a5,6a9)')'ano','MEDIA','posto1','posto2',
&  'posto3','posto4','posto5'
write(23,'(a5,6a9)')'mes','MEDIA','posto1','posto2',
&  'posto3','posto4','posto5'
write(24,'(3a5,6a9)')'dia','mes','ano','posto1','posto2','posto3',
&  'posto4','posto5'
write(25,'(a5,6a9)')'ano','posto1','posto2','posto3',
&  'posto4','posto5'
c
c  gerar contador de dias-----
c
do iy=1,ny
  iyr(iy)=ibeg+iy-1
  do im=1,nm
    if(im.eq.1.or.im.eq.3.or.im.eq.5.or.im.eq.7.or.im.eq.8.or.
&    im.eq.10.or.im.eq.12)nd(im,iy)=31
    if(im.eq.4.or.im.eq.6.or.im.eq.9.or.im.eq.11)
&    nd(im,iy)=30
    if(im.eq.2)nd(im,iy)=28
    if(iyr(iy).eq.1940.or.iyr(iy).eq.1944.or.iyr(iy).eq.1948.
&    or.iyr(iy).eq.1952.or.iyr(iy).eq.1956.or.iyr(iy).eq.1960.
&    or.iyr(iy).eq.1964.or.iyr(iy).eq.1968.or.iyr(iy).eq.1972.
&    or.iyr(iy).eq.1976.or.iyr(iy).eq.1980.or.iyr(iy).eq.1984.
&    or.iyr(iy).eq.1988.or.iyr(iy).eq.1992.or.iyr(iy).eq.1996.
&    or.iyr(iy).eq.2000.or.iyr(iy).eq.2004.or.iyr(iy).eq.2008)
&    then
      if(im.eq.2)nd(im,iy)=29
    endif
  enddo
enddo
c
c  leia os cabecalhos dos arquivos de entrada-----
c
do is=1,ns
  read(9+is,*)adum
enddo
c
c  leia a chuva diaria dos arquivos de entrada-----
c
write(*,'(a40)')  Inicio - leitura dos dados'
c  write(*,'(3a5,5a9)')'dia','mes','ano','posto1','posto2','posto3',
c  &  'posto4','posto5'
c

```



```

do iy=1,ny
  do im=1,nm
    do is=1,ns
      read(9+is,*)imo,iyo,(p(id,im,iy,is),id=1,nd(im,iy))
      if(iyo.ne.iyr(iy).or.im.ne.imo)then
        write(*,'(a20,a5,5i5)') 'data mismatch','stat=',is,iyo,
&      imo,iyr(iy),im
        pause
      endif
    enddo
    if(iyr(iy).eq.1980. and.im.eq.7)then
      do id=1,nd(im,iy)
        write(*,'(3i5,6f9.1)')id,im,iyr(iy),
&      (p(id,im,iy,is),is=1,ns)
      enddo
    endif
  enddo
enddo
write(*,'(a40)')' Final - leitura dos dados'
pause

c
c escreva as datas/chuva com falha 'plu_****_falha.txt'-----
c as falhas sao simultaneas, isto ,, ocorrem em todos os postos
c
write(*,'(a30)')' Inicio da lista de falhas'
write(*,'(3a5,5a9)')'dia','mes','ano','posto1','posto2','posto3',
& 'posto4','posto5'
c
do iy=1,ny
  do im=1,nm
    do id=1,nd(im,iy)
      pdum1=0.
      do is=1,ns
        pdum1=pdum1+p(id,im,iy,is)
      enddo
      pdum1=pdum1/ns
      if(pdum1.eq.codfal) then
        write(24,'(3i5,6f9.1)')id,im,iyr(iy),
&      (p(id,im,iy,is),is=1,ns)
        write(*,'(3i5,6f9.1)')id,im,iyr(iy),
&      (p(id,im,iy,is),is=1,ns)
      endif
    enddo
  enddo
enddo

c
write(*,'(a30)')' Final da lista de falhas'
pause

c
c escreva a chuva diaria maxima anual na tela-----
c
write(*,'(/,a30)')' Inicio - Chuva diaria maxima anual'
write(*,'(3a5,5a9)')'dia','mes','ano','posto1','posto2','posto3',
& 'posto4','posto5'
do iy=1,ny
  do is=1,ns
    pmaxy(iy,is)=codfal
  enddo
  do im=1,nm
    do id=1,nd(im,iy)
      do is=1,ns

```

```

        if(p(id,im,iy,is).gt.pmaxy(iy,is))then
            pmaxy(iy,is)=p(id,im,iy,is)
        endif
    enddo
enddo
enddo
write(*,'(i5,6f9.1)')iyr(iy),(pmaxy(iy,is),is=1,ns)
write(25,'(i5,6f9.1)')iyr(iy),(pmaxy(iy,is),is=1,ns)
enddo
write(*,'(a30)')'    Final - Chuva diaria maxima anual'
pause
c
c   escreva a chuva diaria de cada posto e a media em-----
c   'plu_*****_dia.txt'-----
c
write(*,'(/,a45)')'    Inicio - Chuva diaria na bacia'
write(*,'(3a5,5a9)')'dia','mes','ano','postol','posto2','MEDIA'
c
do iy=1,ny
    do im=1,nm
        do id=1,nd(im,iy)
            ncdum=0
            pmdb(id,im,iy)=codfal
            pdum=0.
            do is=1,ns
                if(p(id,im,iy,is).ne.codfal)then
                    pdum=pdum+p(id,im,iy,is)
                    ncdum=ncdum+1
                endif
            enddo
            if(ncdum.ne.0)then
                pmdb(id,im,iy)=pdum/float(ncdum)
            endif
            write(20,'(3i5,6f9.1)')id,im,iyr(iy),pmdb(id,im,iy),
&                (p(id,im,iy,is),is=1,ns)
            if(pmdb(id,im,iy).eq.codfal)then
                write(*,'(3i5,6f9.1)')id,im,iyr(iy),pmdb(id,im,iy),
&                (p(id,im,iy,is),is=1,ns)
            endif
        enddo
    enddo
enddo
write(*,'(a45)')'    Final - Chuva diaria na bacia'
pause
c
c   produce monthly file-----
c
write(*,'(a45)')'    Inicio - Chuva mensal na bacia'
write(*,'(2a5,5a9)')'mes','ano','MEDIA'
do iy=1,ny
    do im=1,nm
        pmmb(im,iy)=0.
        ifal=0
        idad=0
        do is=1,ns
            pm(im,iy,is)=0.
        enddo
        do id=1,nd(im,iy)
            if(pmdb(id,im,iy).eq.codfal)then
                ifal=ifal+1
            endif
        enddo
    enddo
enddo

```

```

else
    pmmb(im, iy)=pmmb(im, iy)+pmdb(id, im, iy)
    idad=idad+1
endif
do is=1, ns
if(p(id, im, iy, is).ne.codfal.and.pm(im, iy, is).ne.codfal)
&
    then
        pm(im, iy, is)=pm(im, iy, is)+p(id, im, iy, is)
    else
        pm(im, iy, is)=codfal
    endif
enddo
enddo
if(ifal.le.nfal) then
    pmmb(im, iy)=pmmb(im, iy)
else
    pmmb(im, iy)=codfal
    write(*, '(2i5, f9.1)') im, iyr(iy), pmmb(im, iy)
endif
write(21, '(2i5, 5f9.1)') im, iyr(iy), pmmb(im, iy),
&
    (pm(im, iy, is), is=1, ns)
enddo
enddo
write(*, '(a45)') '    Final - Chuva mensal na bacia'
pause
c
c
c
produce yearly file-----
write(*, '(a45)') '    Inicio - Chuva anual na bacia'
do iy=1, ny
    pmyb(iy)=0.
    do is=1, ns
        py(iy, is)=0.
    enddo
    do im=1, nm
        if(pmmb(im, iy).ne.codfal) then
            pmyb(iy)=pmyb(iy)+pmmb(im, iy)
        else
            pmyb(iy)=codfal
        endif
    do is=1, ns
        if(pm(im, iy, is).ne.codfal.and.py(iy, is).ne.codfal)
&
            then
                py(iy, is)=py(iy, is)+pm(im, iy, is)
            else
                py(iy, is)=codfal
            endif
        enddo
    enddo
    if(pmyb(iy).eq.codfal)write(*, '(i5, 6f8.1)') iyr(iy), pmyb(iy)
    write(22, '(i5, 6f9.1)') iyr(iy), pmyb(iy), (py(iy, is), is=1, ns)
enddo
write(*, '(a45)') '    Final - Chuva anual na bacia'
pause
c
c
c
produce climatology file-----
do im=1, nm
    pclimb(im)=0.
    nc=0
    ndum(is)=0

```

```

do is=1,ns
  pclim(im,is)=0.
  ndum(is)=0
enddo
do iy=1,ny
  if (pmmb(im,iy).ne.codfal) then
    pclimb(im)=pclimb(im)+pmmb(im,iy)
    nc=nc+1
  endif
  do is=1,ns
    if (pm(im,iy,is).ne.codfal) then
      pclim(im,is)=pclim(im,is)+pm(im,iy,is)
      ndum(is)=ndum(is)+1
    endif
  enddo
enddo
pclimb(im)=pclimb(im)/float(nc)
do is=1,ns
  pclim(im,is)=pclim(im,is)/float(ndum(is))
enddo
write(23,'(i5,6f9.1)')im,pclimb(im),(pclim(im,is),is=1,ns)
enddo
c
do is=1,ns
  close(9+is)
enddo
do iout=20,25
  close(iout)
enddo
c
stop
end
c
c *****
c SUBROUTINE MOMENT (DATA,N, AVE, SDEV)
c *****
c DIMENSION DATA (N)
c IF(N.LE.1)PAUSE 'N must be at least 2'
c S=0.
c DO 11 J=1,N
c   S=S+DATA(J)
11 CONTINUE
c AVE=S/N
c VAR=0.
c DO 12 J=1,N
c   S=DATA(J)-AVE
c   P=S*S
c   VAR=VAR+P
12 CONTINUE
c VAR=VAR/(N-1)
c SDEV=SQRT(VAR)
c RETURN
c END

```

ANEXO 3 – ROTINA FORTRAN DADOS DE VAZÃO NATURAL (FLUMES.F)

```

c      *****
c      Este programa le os dados de vazao naturalizada mensal do ONS e
c      converte a vazao em defludio na bacia incremental
c      Validade: Aproveitamentos no trecho de cabeceira das bacias
c
c      Alexandre K. Guetter
c      UFPR 07/JUN/2010
c      *****
c
c      parameter (nm=12, ibeg=1942, iend=2007, ny=iend-ibeg+1)
c      parameter (ns=1, areadrenl=50464)
c      character*80 adum
c
c      dimension iyr (ny), nd (nm, ny),
c      &          qm (nm, ny), qy (ny), qclim (nm), qsdev (nm), qdum (ny),
c      &          defm (nm, ny), defy (ny), defclim (nm), defsdev (nm), defdum (ny)
c
c      open (10, file='Q_FURNAS_ONS.txt', status='old')
c
c      open (21, file='Q_FURNAS_mes.txt')
c      open (22, file='Q_FURNAS_ano.txt')
c      open (23, file='Q_FURNAS_clim.txt')
c
c      read header of input file-----
c
c      write (*, *) ' Inicio da rodada fludia'
c      do i=1, 1
c          read (10, *) adum
c      enddo
c
c      write headers-----
c
c      write (21, ' (2a5, 9a9) ') 'mes', 'ano', 'Qmes', 'Defmes'
c      write (22, ' (a5, 9a9) ') 'ano', 'Qano', 'Defano'
c      write (23, ' (a5, 9a9) ') 'mes', 'Qclim', 'Defclim', 'Qsdev', 'Defsdev'
c
c      gerar contador de dias-----
c
c      do iy=1, ny
c          iyr (iy)=ibeg+iy-1
c          do im=1, nm
c              if (im.eq.1.or.im.eq.3.or.im.eq.5.or.im.eq.7.or.im.eq.8.or.
c      &          im.eq.10.or.im.eq.12) nd (im, iy)=31
c              if (im.eq.4.or.im.eq.6.or.im.eq.9.or.im.eq.11)
c      &          nd (im, iy)=30
c              if (im.eq.2) nd (im, iy)=28
c              if (iyr (iy).eq.1940.or.iyr (iy).eq.1944.or.iyr (iy).eq.1948.
c      &          or.iyr (iy).eq.1952.or.iyr (iy).eq.1956.or.iyr (iy).eq.1960.
c      &          or.iyr (iy).eq.1964.or.iyr (iy).eq.1968.or.iyr (iy).eq.1972.
c      &          or.iyr (iy).eq.1976.or.iyr (iy).eq.1980.or.iyr (iy).eq.1984.
c      &          or.iyr (iy).eq.1988.or.iyr (iy).eq.1992.or.iyr (iy).eq.1996.
c      &          or.iyr (iy).eq.2000.or.iyr (iy).eq.2004.or.iyr (iy).eq.2008)
c      &          then
c                  if (im.eq.2) nd (im, iy)=29
c              endif
c          enddo
c      enddo
c
c

```

```

c   read Q in m3/s, convert to mm/day and write monthly q & def-----
c
do iy=1,ny
  read(10,*)iyo,(qm(im,iy),im=1,nm)
  if(iyo.ne.iyr(iy))then
    write(*,'(a15,3i5,f6.1,3i5,)' ) 'data mismatch',iyo,iyr(iy)
    pause
  endif
c   conversao de unidades de m3/s para mm/dia-----
  do im=1,nm
    defm(im,iy)=qm(im,iy)*(3.6*24.*nd(im,iy))/areadren1
    write(21,'(2i5,2f9.2)')im,iyr(iy),qm(im,iy),defm(im,iy)
  enddo
enddo

c
c   produce and write yearly q & def in mm/year-----
c
do iy=1,ny
  qy(iy)=0.
  defy(iy)=0.
  do im=1,nm
    qy(iy)=qy(iy)+qm(im,iy)
    defy(iy)=defy(iy)+defm(im,iy)
  enddo
  qy(iy)=qy(iy)/float(nm)
  write(22,'(i5,2f9.2)')iyr(iy),qy(iy),defy(iy)
enddo

c
c   produce climatology file-----
c
do im=1,nm
  qclim(im)=0.
  defclim(im)=0.
  do iy=1,ny
    qdum(iy)=qm(im,iy)
    defdum(iy)=defm(im,iy)
  enddo
  call moment(qdum,ny,ave1,sdev1)
  qclim(im)=ave1
  qsdev(im)=sdev1
  call moment(defdum,ny,ave2,sdev2)
  defclim(im)=ave2
  defsdev(im)=sdev2
  write(23,'(i5,4f9.2)')im,qclim(im),defclim(im),qsdev(im),
&
  &
  defsdev(im)
enddo
write(*,*) ' Final da rodada fludia'

c
close(10)
do iout=21,23
  close(iout)
enddo

c
stop
end

c
c   *****
c   SUBROUTINE MOMENT(DATA,N,AVE,SDEV)
c   *****
c   DIMENSION DATA(N)
c   IF(N.LE.1)PAUSE 'N must be at least 2'
c   S=0.
c   DO 11 J=1,N
c     S=S+DATA(J)
11  CONTINUE
c   AVE=S/N
c   VAR=0.
c   DO 12 J=1,N

```

```
      S=DATA (J) -AVE
      P=S*S
      VAR=VAR+P
12  CONTINUE
      VAR=VAR/ (N-1)
      SDEV=SQRT (VAR)
      RETURN
      END
```

ANEXO 4 – ROTINA FORTRAN DADOS EVAPOTRANSPIRAÇÃO (PETFURNAS.F)

```

c *****
c Este programa constroi as series de evaporacao potencial
c media mensal a a partir do balanco anual.
c Referencia: CD ROM Balancos Hidricos Climatologicos do Brasil.
c Sentelhas, P.C.; Pereira, A.R.; Marin, F.R.; Angelocci, L.R.;
c Alfonsi, R.R.; Caramori, P.H.; Swart, S.
c Esalq/USP, 1999.
c
c Alexandre K. Guetter
c UFPR 25/maio/2010
c *****
c
c Descricao dos parametros:
c nm=numero de meses em 1 ano
c ibeg=ano inicial da serie
c iend=ano final da serie
c ns=numero de postos na bacia
c ny=numero de anos da serie
c
c Descricao das variaveis:
c pet=dado de evapotranspiracao potencial por posto
c petave=media espacial do ciclo anual do pet
c petm=evapotranspiracao mensal em mm/mes
c
c Esse programa é especifico para Furnas.
c
c *****
c
c parameter (ns=4,nm=12,ibeg=1942,iend=2010)
c parameter (ny=iend-ibeg+1)
c
c character*80 adum
c
c dimension pet (ns,nm),petave (nm),iyr (ny)
c
c abrir os arquivos de entrada -----
c open(11,file='ETP_Barbacena.txt',status='old')
c open(12,file='ETP_SaoLoure.txt',status='old')
c open(13,file='ETP_Lavras.txt',status='old')
c open(14,file='ETP_Machado.txt',status='old')
c
c abrir os arquivos de saida -----
c open(20,file='pet_Furnas_mes.txt')
c
c write headers-----
c write(20,'(2a5,a9)')'ano','mes','pet'
c
c read pet-----
c do is=1,ns
c   ifile=10+is
c   read(ifile,*)adum
c   do im=1,nm
c     read(ifile,*)idum,pet(is,im)

```



```

        enddo
    enddo
c
c  media espacial do ciclo anual do PET-----
do im=1,nm
    petave(im)=0.
    do is=1,ns
        petave(im)=petave(im)+pet(is,im)
    enddo
    petave(im)=petave(im)/float(ns)
    write(*,'(i5,10f8.1)')im,(pet(is,im),is=1,ns),petave(im)
enddo
c
c  pause
c
c  write monthly petm in mm/month-----
do iy=1,ny
    iyr(iy)=ibeg+iy-1
    do im=1,nm
        write(20,'(2i5,f8.1)')iyr(iy),im,petave(im)
    enddo
enddo
c
c  stop
c  end

```

ANEXO 5 – ROTINA FORTRAN DE BALANÇO HÍDRICO MENSAL (BALMES.F)

```

C      *****
C      This program computes the monthly water balance.
C      Land-surface water balance, based on linear evap model.
C      Actual evap=Potential evap * soil water saturation fraction
C
C      Alex Guetter UFPR, 08/04/2010
C      *****
C
      parameter (nm=12,ibeg=1942,iend=1988)
      parameter (ny=iend-ibeg+1,np=ny*nm)
      character*80 adum
      dimension  pet(np),q(np),p(np),aet(np),x(np),r(np),
&      petave(nm),aetave(nm),qave(nm),pave(nm),xave(nm),
&      petsdev(nm),aetsdev(nm),qsdev(nm),psdev(nm),xsdev(nm),
&      pet1(ny,nm),q1(ny,nm),p1(ny,nm),x1(ny,nm),aet1(ny,nm),
&      anomp(ny,nm),anomq(ny,nm)
C
C      -----
C      open input files
C      -----
      open(unit=11,file='inbal_month.f',status='old')
      open(unit=12,file='pet_Furnas_mes.txt',status='old')
      open(unit=13,file='plu_FURNAS_mes.txt',status='old')
      open(unit=14,file='Q_FURNAS_mes.txt',status='old')
C
C      -----
C      open output files
C      -----
      open(unit=22,file='flux_FURNAS')
      open(unit=24,file='ratio_FURNAS')
      open(unit=25,file='clim_FURNAS')
      open(unit=27,file='sdev_FURNAS')
      open(unit=28,file='anom_FURNAS')
      open(unit=30,file='sw_FURNAS')
C
C      write output file headers-----
C
      write(22,'(2a5,5a8)') 'mes','ano','pet','aet','prec',
&      'outf','soil'
      write(24,'(2a5,5a8)') 'mes','ano','q/p','pet/p','aet/pet'
      write(25,'(a,5x,a,10x,a,8x,a,7x,a,7x,a,7x)') 'mon',
&      'pet','aet','prec','outf','soil'
      write(27,'(a,5x,a,10x,a,8x,a,7x,a,7x,a,7x)') 'mon',
&      'pet','aet','prec','outf','soil'
      write(28,'(2a5,3a8)') 'mes','ano','chuva','vazao'
      write(30,'(2a5,a8)') 'mes','ano','SW'
C
C      read inial values and coeff-----
C
      read(11,'(a)')adum
      read(11,*) x0,dt,xi,c,cpet
C
C      x0=soil water capacity in mm (initial guess)
C      dt=time interval (months)
C      xi=soil water initial value (fraction of x0)

```

```

c      c=groundwater coefficient (applied to observed streamflow)
c      cpet=PET correction coefficient (degree of belief)
c
c      read input fluxes-----
c
c      read(12, ' (a) ') adum
c      read(13, ' (a) ') adum
c      read(14, ' (a) ') adum
c
c      it=0
c      ip=0
c      do iy=1,ny
c          do im=1,12
c              ip=ip+1
c              read(12,*) imo,iyr,pet(ip)
c              read(13,*) imo,iyr,p(ip)
c              read(14,*) imo,iyr,qdum,q(ip)
c              write(*,' (2i5,3f8.1) ') imo,iyr,pet(ip),p(ip),q(ip)
c              pet(ip)=cpet*pet(ip)
c              x(ip)=0.
c          enddo
c      pause
c      enddo
c      PAUSE
c
c      water balance-----
c
c      ip=0
c      x(1)=xi*x0
c      r(1)=xi
c      aet(1)=pet(1)*r(1)
11  do 100 iy=1,ny
c          nml=nm
c          if(iy.eq.ny) nml=nm-1
c          do 200 im=1,nml
c              ip=ip+1
c              x(ip+1)=(dt*(p(ip+1)-pet(ip+1)*x(ip)/2./x0-
&              (1.+c)*q(ip+1))+x(ip))/(1.+dt*pet(ip+1)/2./x0)
c
c              r(ip+1)=(x(ip)+x(ip+1))/x0/2.
c              aet(ip+1)=pet(ip+1)*r(ip+1)
c
c          200  continue
c          100  continue
c
c      search for rmax and rmin-----
c
c      ip=0
c      rmax=0.
c      xmin=10000.
c      do iy=1,ny
c          do im=1,nm
c              ip=ip+1
c              if(r(ip).gt.rmax) rmax=r(ip)
c              if(x(ip).lt.xmin) xmin=x(ip)
c          enddo
c      enddo
c
c      secure x>0.-----
c
c      if (xmin.lt.0.0) then

```

```

        x0=x0+10.0
        x(1)=xi*x0
        write(*,'(a,i5,3x,a,f7.2,3x,a,f6.3)') 'it=',it,'x0=',x0,
& 'xmin=',xmin
        ip=0
        go to 11
    endif
c
c iterations to satisfy 0.99<rmax<1.01-----
c
    it=it+1
c
    if (rmax.lt.0.99) then
        x0=x0-1.0
        x(1)=xi*x0
        write(*,'(a,i5,3x,a,f7.2,3x,a,f6.3)') 'it=',it,'x0=',x0,
& 'rmax=',rmax
        ip=0
        go to 11
    endif
c
    if (rmax.gt.1.01) then
        x0=x0+1.0
        x(1)=xi*x0
        write(*,'(a,i5,3x,a,f7.2,3x,a,f6.3)') 'it=',it,'x0=',x0,
& 'rmax=',rmax
        ip=0
        go to 11
    endif
c
c output to ratio_month & flux_month-----
c
    ip=0
    xmin1=10000
    do iy=1,ny
        iyr=iy+ibeg-1
        do im=1,nm
            ip=ip+1
            year=iy+float(im-1)/12.
            clim=pet(ip)/p(ip)
            run=q(ip)/p(ip)
            ppe=aet(ip)/pet(ip)
            write(24,'(2i5,5f8.4)') im,iyr,year,run,clim,ppe
c
c Apply a 13-month filter
c
            if(ip.ge.7.and.ip.le.(np-7))then
                p2=(p(ip-6)+p(ip-5)+p(ip-4)+p(ip-3)+p(ip-2)+p(ip-1)+
& p(ip)+p(ip+1)+p(ip+2)+p(ip+3)+p(ip+4)+p(ip+5)+
& p(ip+6))/13.
                q2=(q(ip-6)+q(ip-5)+q(ip-4)+q(ip-3)+q(ip-2)+q(ip-1)+
& q(ip)+q(ip+1)+q(ip+2)+q(ip+3)+q(ip+4)+q(ip+5)+
& q(ip+6))/13.
                pet2=(pet(ip-6)+pet(ip-5)+pet(ip-4)+pet(ip-3)+pet(ip-2)
& +pet(ip-1)+pet(ip)+pet(ip+1)+pet(ip+2)+pet(ip+3)+pet(ip+4)
& +pet(ip+5)+pet(ip+6))/13.
                aet2=(aet(ip-6)+aet(ip-5)+aet(ip-4)+aet(ip-3)+aet(ip-2)
& +aet(ip-1)+aet(ip)+aet(ip+1)+aet(ip+2)+aet(ip+3)+aet(ip+4)
& +aet(ip+5)+aet(ip+6))/13.
            else
                pet2=pet(ip)

```



```

    aetave(im)=ave
    aetsdev(im)=sdev
    call moment(nm,im,p1,ny,ave,sdev)
    pave(im)=ave
    psdev(im)=sdev
    call moment(nm,im,q1,ny,ave,sdev)
    qave(im)=ave
    qsdev(im)=sdev
    call moment(nm,im,x1,ny,ave,sdev)
    xave(im)=ave
    xsdev(im)=sdev
    if(ave.lt.cmin)cmin=ave
  enddo
c
c  remove climatological minimum-----
c
  do im=1,nm
c    xave(im)=xave(im)-cmin
    xave(im)=xave(im)
  enddo
c
c  write clim output-----
c
  do im=1,nm
    write(25,'(i3,7f11.2)')im,petave(im),aetave(im),
&    pave(im),qave(im),xave(im)
&    write(*,'(i3,7f11.2)')im,petave(im),aetave(im),
&    pave(im),qave(im),xave(im)
  enddo
c
  do im=1,nm
    write(27,'(i3,7(f11.2)')im,petsdev(im),aetsdev(im),
&    psdev(im),qsdev(im),xsdev(im)
  enddo
c
c  anomalies-----
c
  do iy=1,ny
    do im=1,nm
      iyr=ibeg+iy-1
      anomp(iy,im)=p1(iy,im)-pave(im)
      anomq(iy,im)=q1(iy,im)-qave(im)
      write(28,'(2i5,2f8.1)')im,iyr,anomp(iy,im),anomq(iy,im)
    enddo
  enddo
c
  stop
  end
c
c  *****
c  Subroutine MOMENT
c  *****
SUBROUTINE MOMENT(nm,iff,DATA,N,AVE,SDEV)
DIMENSION DATA(N,nm)
IF(N.LE.1)PAUSE 'N must be at least 2'
S=0.
DO 11 J=1,N
  S=S+DATA(J,iff)
11 CONTINUE
AVE=S/N
VAR=0.

```

```
DO 12 J=1,N
  S=DATA(J, iff) -AVE
  P=S*S
  VAR=VAR+P
12 CONTINUE
VAR=VAR/(N-1)
SDEV=SQRT(VAR)
RETURN
END
```