

PREVISÃO DE AFLUÊNCIAS DIÁRIAS PARA HORIZONTES DE 1 A 7 DIAS
ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM ESTOCÁSTICA – MODELO PREVIVAZH

Angela Regina Livino de Carvalho

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
CIVIL

Aprovada por:

Prof. Flávio César Borba Mascarenhas , D.Sc.

Prof. Jorge Machado Damázio, D.Sc.

Prof. Fernanda da Serra Costa, D.Sc.

Prof. Rui Carlos Vieira da Silva , D.Sc.

Prof. Maria Elvira Piñeiro Maceira , D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2001

LIVINO DE CARVALHO, ANGELA REGINA

Previsão de Afluências Diárias para Horizontes
de 1 a 7 Dias Através de Uma Abordagem Estocástica
[Rio de Janeiro] 2001

VII, 86 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil , 2001)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE

1. Previsão de Vazão

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos Meus Pais
Regina e Carlos.

AGRADECIMENTOS

Ao CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, representado aqui por Maria Elvira Piñero Maceira, Antônio Ricardo Cavalcante Dias de Carvalho e Nelson Martins, respectivamente Coordenadora do Programa de Estudos Energéticos, atual Chefe da Área de Conhecimento de Sistemas e Chefe da Área de Conhecimento de Sistemas até Dezembro de 1999, pelo apoio e pela oportunidade de desenvolvimento desta tese como Bolsista de Mestrado.

À Fernanda da Serra Costa e Jorge Machado Damázio pela sugestão do tema, orientação, apoio e incentivo para a realização desta tese.

À COPPE\UFRJ em especial aos professores da Área de Recursos Hídricos, pelos ensinamentos no decorrer do curso.

Ao ONS – Operador Nacional do Sistema, seja pelo suporte financeiro dado a esta tese como parte do Projeto de Previsões de Vazões, seja pelo fornecimento das séries de vazões ou seja pela imensa ajuda advinda de proveitosas discussões com o Engenheiro Luis Guilherme Guilhon e a Engenheira Helena Maria Dantas, respectivamente Engenheiro da Supervisão de Hidrologia Operacional e Supervisora da Hidrologia Operacional do ONS.

Aos amigos do Cepel que direta ou indiretamente contribuíram para esta tese, especialmente Eduardo Evangelista, Vitor Duarte, Paulo Quintão, Luciano Xavier, Viviane Morelli Rossi, seja auxiliando na edição, nas revisões ou apenas pelo apoio e compreensão sempre dispensados a mim nestes anos de agradável convivência.

Ao LABGIS – Cepel, especialmente ao Geógrafo Marcelo Dantas de Amorim pela grande ajuda na elaboração dos mapas utilizados no Capítulo 3.

Além de dedicar não posso deixar de agradecer em especial ao meu pai, o Engenheiro Carlos Francisco José Livino de Carvalho pelo exemplo como brilhante profissional, uma das grandes motivações na escolha da minha profissão e também a minha mãe Regina Vera Livino de Carvalho pelo imenso carinho e incentivo com que sempre acompanharam os meus estudos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

PREVISÃO DE AFLUÊNCIAS DIÁRIAS PARA HORIZONTES DE 1 A 7 DIAS
ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM ESTOCÁSTICA

Angela Regina Livino de Carvalho

Dezembro/2001

Orientadores: Flavio César Borba Mascarenhas,
Jorge Machado Damázio e
Fernanda da Serra Costa.

Programa: Engenharia Civil

Esta tese apresenta uma modelagem estocástica para previsão de vazões diárias a serem utilizadas na Programação da Operação Diária do Sistema Hidroenergético Brasileiro. A modelagem baseia-se na desagregação, em intervalos diários, das previsões de afluências semanais utilizadas na elaboração do Planejamento de Curto Prazo da Operação Hidroenergética do Sistema Interligado Brasileiro. A metodologia de desagregação tem uma abordagem não paramétrica, e faz uso das duas últimas afluências diárias observadas, assim como de sequências sintéticas de vazões diárias condicionadas às observadas. A modelagem, além da vantagem da menor complexidade em relação aos modelos chuva-vazão, garante a preservação da estrutura de dependência temporal das previsões, para as semanas usadas no Planejamento de Curto Prazo e incorpora as características do processo natural a nível diário, conforme tratado no modelo de geração de sequências de vazões diárias. Foram utilizados como estudo de caso as séries diárias de vazões afluentes aos aproveitamentos de Jupuí, Sobradinho, Tucuruí e Foz do Areia.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

1 UP TO 7 DAYS HORIZON INFLOW FORECASTING USING A STOCHASTIC APPROACH

Angela Regina Livino de Carvalho

December 2001

Advisors: Flavio César Borba Mascarenhas,
Jorge Machado Damázio e
Fernanda da Serra Costa.

Department: Civil Engineering

This thesis presents a Stochastic Model to Daily Inflow Forecasting which obtains forecasts daily inflows to be used on Daily Operation Programming of HydroElectrical Brazilian System. This model uses a non-parametric disaggregation method of weekly forecasts (which are used to Short-term Operation Planning of Hydro-Electrical Brazilian System) in daily intervals. The method uses the last two observed values of daily inflows and synthetic series of daily inflows. This modeling, besides it's less complexity when compared with deterministic rainfall-runoff models grants the preservation of time structural dependency of weekly inflow forecasts and considers the main characteristics of natural process of daily inflow. This thesis shows four applications of this model to Foz do Areia, Tucuruí, Jupia and Sobradinho sub-basins.

ÍNDICE

Capítulo I	Introdução	1
I.1	Previsão	1
I.2	Modelos de Previsão de Vazão	3
I.3	Enunciado	6
I.4	Conteúdo dos Capítulos	6
Capítulo II	Desenvolvimento	8
II.1	Premissas	8
II.2	Descrição Metodológica da modelagem PREVIVAZH	9
II.2.1	Algoritmo Básico do PREVIVAZH	9
II.2.2	Atualização da Previsão de Vazão Semanal	10
II.2.3	Escolha da Opção de Atualização da Previsão Semanal	14
II.2.4	Correção da Tendenciosidade do Erro de Previsão Semanal	15
II.2.5	Procedimento Para Previsão de Afluências Para Horizontes Menores que 7 Dias	16
Capítulo III	Aplicação	20
III.1	Características Hidro-Energéticas dos Aproveitamentos Analisados	20
III.1.1	Sub-Sistema Sul	21
III.1.2	Sub-Sistema Sudeste	22
III.1.3	Sub-Sistema Nordeste	24
III.1.4	Sub-Sistema Norte	27
III.2	Caracterização Estatística das Séries de Vazões Estudadas	29
Capítulo IV	Resultados	34
IV.1	Calibração da modelagem	34
IV.1.1	Escolha da Opção de Atualização das Previsões Semanais	35
IV.1.2	Correção da Tendenciosidade das Previsões Semanais	39
V.2	Análise das Previsões Diárias	43
Capítulo V	Conclusões e Recomendações	69
Capítulo VI	Referências	71
Apêndice A	Breve Descrição do Modelo DIANA	73
A.1	Geração Condicionada de Sequências de Vazões Diárias	75
Apêndice B	Correção de Discrepâncias nos Histórico de Vazões Diárias	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das frequências das M médias semanais, \overline{QD}^m	11
Figura 2 – Interpolação para $qsem \in [a,b)$	12
Figura 3 – Interpolação para $qsem \in (c, d]$	12
Figura 4 - Principais Bacias Hidrográficas Brasileiras.	21
Figura 5 - Bacia do Rio Paraná e Sub-bacia do Rio Iguaçu. Destacados os aproveitamentos de Foz do Areia e Jupia.	22
Figura 6 - Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, destacado o aproveitamento hidrelétrico de Sobradinho.	25
Figura 7 - Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins, em destaque o aproveitamento hidroelétrico de Tucuruí.	27
Figura 8 - Legenda das informações presentes nos gráficos Box-and-Whiskers apresentados nas figuras 8 a 11 para as vazões semanais afluentes aos quatro aproveitamentos estudados nesta tese.	30
Figura 9 - Gráfico <i>Box-and-Whiskers</i> com a análise das afluições semanais ao Aproveitamento de Jupia.	32
Figura 10 - Gráfico <i>Box-and-Whiskers</i> com a análise das afluições ao Aproveitamento de Foz do Areia.	32
Figura 11 - Gráfico <i>Box-and-Whiskers</i> com a análise das afluições ao Aproveitamento de Tucuruí.	33
Figura 12 - Gráfico <i>Box-and-Whiskers</i> com a análise análise das afluições ao Aproveitamento de Sobradinho.	33
Figura 13 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas as opções de atualização para o Aproveitamento de Jupia.	37
Figura 14 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas as opções de atualização para o Aproveitamento de Foz do Areia.	37
Figura 15 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas as opções de atualização para o Aproveitamento de Tucuruí.....	38
Figura 16 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas as opções de atualização para o Aproveitamento de Sobradinho.	38
Figura 17 – Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Jupia. Período analisado: 1985 a 1999.	40
Figura 18 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Sobradinho. Período analisado: 1985 a 1999.....	41
Figura 19 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Foz do Areia, sem correção da tendenciosidade da previsão de vazões semanais. Período analisado: 1989 a 1998.	41
Figura 20 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Tucuruí. Sem correção da tendenciosidade da previsão semanal. Período analisado: 1985 a 1999.....	42

Figura 21 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Foz do Areia, com correção da tendenciosidade da previsão de vazões semanais. Período analisado: 1989 a 1998.	42
Figura 22 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Tucuuruí. Após correção da tendenciosidade da previsão semanal. Período analisado: 1985 a 1999.	43
Figura 23 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para a melhor opção de atualização para o Aproveitamento de Jupiaí.	45
Figura 24 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para a melhor opção de atualização para o Aproveitamento de Foz do Areia.	45
Figura 25 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas a melhor opção de atualização para o Aproveitamento de Tucuuruí.	46
Figura 26 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para a melhor opção de atualização para o Aproveitamento de Sobradinho.	46
Figura 27 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o primeiro dia da semana. Aproveitamento: Jupiaí. Período Analisado: 1985 a 1999.	47
Figura 28 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o segundo dia da semana. Aproveitamento: Jupiaí. Período Analisado: 1985 a 1999.	47
Figura 29 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o terceiro dia da semana. Aproveitamento: Jupiaí. Período Analisado: 1985 a 1999.	48
Figura 30 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quarto dia da semana. Aproveitamento: Jupiaí. Período Analisado: 1985 a 1999.	48
Figura 31 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quinto dia da semana. Aproveitamento: Jupiaí. Período Analisado: 1985 a 1999.	49
Figura 32 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sexto dia da semana. Aproveitamento: Jupiaí. Período Analisado: 1985 a 1999.	49
Figura 33 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sétimo dia da semana. Aproveitamento: Jupiaí. Período Analisado: 1985 a 1999.	50
Figura 34 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o primeiro dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.	50
Figura 35 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o segundo dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.	51
Figura 36 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o terceiro dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.	51
Figura 37 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quarto dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.	52
Figura 38 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quinto dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.	52
Figura 39 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sexto dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.	53

Figura 40 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sétimo dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.	53
Figura 41 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o primeiro dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.	54
Figura 42 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o segundo dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.	54
Figura 43 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o terceiro dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.	55
Figura 44 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quarto dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.	55
Figura 45 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quinto dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.	56
Figura 46 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sexto dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.	56
Figura 47 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sétimo dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.	57
Figura 48 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o primeiro dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.	57
Figura 49 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o segundo dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.	58
Figura 50 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o terceiro dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.	58
Figura 51 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quarto dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.	59
Figura 52 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quinto dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.	59
Figura 53 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sexto dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.	60
Figura 54 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sétimo dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.	60
Figura 55 – Previsão para 7 dias. Aproveitamento: Jupiá. Período de transição seco/úmido.	61
Figura 56 – Previsão para 7 dias. Aproveitamento: Jupiá. Período de transição úmido/ seco.	61
Figura 57 - Previsão para 7 dias. Aproveitamento: Jupiá. Período úmido.	62
Figura 58 - Previsão para 7 dias. Aproveitamento: Jupiá. Período seco.	62
Figura 59 – Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Foz do areia. Período de transição seco/ úmido.	63
Figura 60 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Foz do areia. Período seco.	63
Figura 61 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Foz do areia. Período seco.	64
Figura 62 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Foz do areia. Período úmido.	64
Figura 63 – Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Sobradinho. Período seco.	65
Figura 64 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Sobradinho. Período de transição úmido/ seco.	65

Figura 65 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Sobradinho.Período úmido.	66
Figura 66 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Sobradinho. Período seco.	66
Figura 67 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Tucuruí. Período úmido.....	67
Figura 68 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Tucuruí. Período de transição úmido/ seco.	67
Figura 69 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Tucuruí.Período seco.....	68
Figura 70 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Tucuruí. Período de transição seco/ úmido.....	68

Capítulo I

Introdução

I.1 Previsão

Prever, *Prae e videre*, etimologicamente a palavra previsão sugere que se quer ver alguma coisa antes que ela exista. Pode-se definir Previsão como: fornecer, num certo instante de tempo, um valor, ainda que sujeito a erros, para o estado futuro de um certo sistema¹. Neste sentido previsão hidrológica consiste em se fornecer valores (e intervalo de confiança) de variáveis hidrológicas (ex.: vazões fluviais, precipitações, níveis de lagos, etc.) com antecedência. A disponibilidade de valores futuros (e de intervalos de confiança) de variáveis hidrológicas, mesmo que sujeitos a erros é ferramenta muito importante no gerenciamento de Recursos Hídricos, portanto as previsões hidrológicas vêm sendo cada vez mais utilizadas em sistemas modernos de Recursos Hídricos.

Segundo O'CONNEL (1977) o gerenciamento dos Recursos Hídricos pode ser dividido em três fases: planejamento, projeto e operação. Na fase de planejamento, a atenção deve estar voltada para identificar se os conjuntos de medidas estruturais poderão alterar a natural distribuição da água, tanto no aspecto qualitativo quanto quantitativo, de acordo com os objetivos estabelecidos. Na fase de projeto deve existir uma investigação mais detalhada dos riscos associados aos projetos selecionados. Em geral, nas fases de planejamento e de projeto, os estudos hidrológicos se concentram na produção de prognósticos (definição de valores médios ou extremos, ex.: vazão *decamilar*, vazão mínima de 10 anos de tempo de retorno). Na fase de operação, o grande interesse está em identificar regras e procedimentos de controle eficientes, (com segurança e custo mínimo) sem deixar de lado os objetivos traçados durante a

¹ Algumas vezes fornece-se, além do valor, um intervalo de confiança para o estado futuro do sistema.

fase de planejamento. A definição de regras e procedimentos de controle na fase de operação, é muitas vezes chamada de Planejamento da Operação, reservando-se o termo operação para as atividades de execução dessas regras e procedimentos. O planejamento da operação tem diferentes horizontes de tempo que interagem entre si: médio prazo, curto prazo e curtíssimo prazo, os dois primeiros estabelecendo metas para os seguintes e o curtíssimo prazo estabelecendo metas para a operação propriamente dita. A previsão de vazões tem grande utilidade prática nos diversos horizontes.

O Setor Elétrico Brasileiro ao final do ano 2000 contava com uma capacidade instalada de 65.787,1 MW, (ONS, 2001), sendo 53.327,6 MW provenientes de usinas hidroelétricas, 4.163,5 MW de usinas térmicas, 1.996 MW de usinas nucleares e 6.300 MW correspondente a 50% da usina hidrelétrica de Itaipu; constata-se que mais de 90% da energia é de base hidrelétrica abrangendo cerca de 70 aproveitamentos hidroelétricos distribuídos ao longo de 12 bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Esses aproveitamentos somados as 15 usinas termelétricas são interligados eletricamente com os principais centros de consumos através de aproximadamente 70.000 km de linhas de transmissão. O Planejamento da Operação destas usinas hidrelétricas tem grande interesse pela previsão contínua², realizada constantemente e independentemente das condições hidrológicas, dos volumes afluentes, para melhor regular os níveis dos reservatórios de forma a maximizar a produção de energia. Consequentemente existe um grande interesse no aprimoramento dos modelos de previsão das aflúncias de vazões aos diferentes aproveitamentos hidrelétricos do Setor Elétrico, que servirá como entrada nos diferentes modelos do planejamento da operação, pois um bom sistema de previsão leva a uma maior eficácia operacional, seja sob o ponto de vista econômico, seja da segurança, dos benefícios sociais ou da preservação do meio ambiente.

Dois tipos principais de previsão têm merecido um esforço de desenvolvimento e aplicação nos modelos do planejamento da operação do Setor Elétrico Brasileiro: uma previsão a nível semanal para as próximas 6 semanas, já utilizada no Planejamento de Curto Prazo e uma previsão a nível diário para os próximos dias, atingindo um

² Segundo TUCCI (1998) a previsão de vazão pode ser dividida em: *eventual ou contínua*. A previsão eventual é de grande importância para o estudo de situações comuns em períodos críticos que ocorrem em definidas épocas do regime hidrológico, enchentes ou estiagens dependendo do objetivo. Por exemplo, a previsão e o alerta de enchentes de um determinado local somente são realizados quando os níveis do rio atingem valores próximos dos críticos; já a previsão de níveis para navegação somente é realizada nos períodos de estiagem, quando existem riscos do rio não ter calado suficiente.

horizonte de até 14 dias, que será utilizada na Programação Diária, que se pretende seja feita de forma centralizada pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, de forma a otimizar a utilização dos recursos energéticos do país. Esta última previsão deverá ser aplicada ainda, na determinação do preço *SPOT* da energia a ser comercializada no Mercado Atacadista de Energia (MAE) no Brasil.

Além de servir como entrada nos modelos da operação eletro-energética, com as recentes mudanças de regulamentação e desestatização do setor elétrico brasileiro, caracterizadas por uma ampla abertura de seus mercados, eliminação de monopólios e retirada do Estado de funções próprias de um empreendedor; cresce a busca pela eficiência e, neste contexto, uma boa previsão de aflúências pode gerar um bom diferencial competitivo.

Além das vantagens diretas, econômicas e competitivas, advindas de uma boa previsão de aflúências (a partir da eficácia operacional), deve-se considerar que, devido ao Sistema Hidrelétrico Brasileiro trabalhar atualmente no limite, uma previsão de aflúências “precisa” pode representar uma diminuição no investimento necessário à expansão do setor e na instalação de termelétricas.

I.2 Modelos de Previsão de Vazão

A previsão hidrológica pode ser feita principalmente através de dois tipos de modelos: os modelos determinísticos (chuva – vazão) e os modelos estocásticos. Os primeiros procuram representar os processos físicos de transformação de chuva em vazão, enquanto que os modelos estocásticos baseiam-se na análise da estrutura de dependência temporal das séries de aflúências. As previsões, nos modelos físicos, são obtidas a partir de dados de precipitações ocorridas e previstas, enquanto que nos modelos estocásticos as previsões são obtidas tendo como base as últimas aflúências observadas. As previsões de vazões para os planejamentos de médio e curto prazos, tendem a ser feitas através de modelos estocásticos. Já as previsões para o curtíssimo prazo, podem ser feitas através de modelos físicos (determinísticos).

Para a realização de previsões hidrológicas são necessárias duas etapas. Na primeira, é estabelecida a série histórica de vazões afluentes (e precipitações no caso do modelo físico), com base em dados observados nos locais de interesse. A segunda etapa consiste na análise destas séries, estimando-se parâmetros que identificam as

características estatísticas do regime hidrológico no local, no caso de modelos estocásticos e do processo de transformação de chuva em vazão, no caso de modelos físicos. A partir desses parâmetros, pode-se obter as previsões. Com o conhecimento das previsões, realiza-se uma análise estatística dos erros de previsão e a validação do modelo.

Em VOGEL (1999), verifica-se que quando alguém estuda previsão de vazão na literatura de Recursos Hídricos, observa que existem duas escolas bem distintas: a estocástica e a determinística. É raro encontrar um engenheiro que tenha uma visão balanceada *do mundo*, que simultaneamente veja os elementos estocásticos e determinísticos na hora de modelar um problema. Esta diferença deriva do sistema educacional, que tende a dar ênfase aos elementos determinísticos.

Durante o ensino elementar os alunos recebem aulas de matemática durante aproximadamente 12 anos e geralmente não têm um simples curso de probabilidade ou estatística. Como se pode esperar que um engenheiro tenha um bom entendimento de probabilidade e/ou estatística com apenas um curso (o que geralmente é dado nos cursos de graduação de engenharia)? Os engenheiros se sentiriam à vontade com os seus conhecimentos de cálculo se tivessem feito apenas uma matéria de cálculo? Obviamente o nosso sistema educacional dá um peso muito maior aos elementos determinísticos do que aos estocásticos.

Considerando o seguinte exemplo de um modelo de representação de uma bacia hidrográfica, onde a vazão num instante t Q_t é uma função complexa das entradas climáticas: precipitação P_t e evapotranspiração EP_t . Em termos matemáticos:

$$Q_t = f_d(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, \dots, EP_t, EP_{t-1}, EP_{t-2}, \dots, W) + e_t \quad (1.1)$$

Onde W representa o conjunto de parâmetros do modelo e e_t representa o erro do modelo. A vazão é gerada a partir de um elemento determinístico: $f_d(.)$ e de um elemento estocástico e_t . Apesar de um modelo deste tipo conter ambos elementos, geralmente é considerado apenas como modelo determinístico, possivelmente por serem os fatores precipitação e evapotranspiração os dominantes no processo. Modelos determinísticos não são exclusivamente baseados em fenômenos físicos, eles sempre contêm componentes empíricos. Usualmente o objetivo é minimizar o erro e_t e um modelo será melhor que outro se apresentar menores erros, portanto a

calibração de um modelo determinístico envolve a minimização do componente de erro. A calibração e validação dos modelos determinísticos não pode ser imaginada desacoplada da análise da componente de erro.

Em geral, diversos desafios práticos tem sido encontrados na aplicação de modelos chuva-vazão no Brasil, podendo-se citar o esforço significativo de calibração dos parâmetros e a exigência de bom funcionamento da rede telemétrica, para a atualização periódica das variáveis de estado do modelo. É importante observar que, nesta abordagem, tanto os erros de medição de chuva e de evaporação, quanto os de previsão de chuva futura, afetam a performance do sistema. Mais ainda, o esquema de atualização periódica de variáveis transfere para o modelo diversos erros do sistema de medição, tais como, flutuações de níveis e imprecisões de curvas de descarga das turbinas e vertedores. Em alternativa aos modelos chuva-vazão, tem-se utilizado simples regressões, tomando-se como variáveis dependentes níveis de réguas de montante na área contribuinte ao aproveitamento. A desvantagem deste método é o tratamento simplificado dos erros, normalmente considerados independentes e de distribuição gaussiana, enquanto que a experiência no tratamento de séries de aflúncias diárias, indica a necessidade de modelagem de estruturas complexas de dependência temporal, com diferenças marcantes entre os períodos de ascensão e recessão das aflúncias, além de distribuições marginais significativamente assimétricas.

Considerando agora um modelo estocástico de regressão para representação de uma bacia hidrográfica:

$$Q_t = f_s(Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3}, \dots, \Omega) + v_t \quad (1.2)$$

Onde Ω novamente representa o parâmetro do modelo, v_t representa o erro do modelo Q_{t-i} representam as vazões passadas que são as entradas do modelo. A vazão é representada por um componente determinístico $f_s(.)$ e por um componente de erro, agora denominado componente estocástico. O que faz deste modelo um modelo estocástico, é que a estrutura de $f_s(.)$ e da componente v_t deve garantir que certas propriedades estatísticas das vazões sejam preservadas, tais como: média, variância, assimetria e correlação serial. Em outras palavras, procura-se garantir a preservação de algumas estatísticas, tais como, a reprodução da matriz do correlograma das aflúncias.

I.3 Enunciado

Esta tese vem apresentar o desenvolvimento da modelagem de previsão de vazões diárias de natureza estocástica - PREVIVAZH, iniciado por LIVINO DE CARVALHO (1999), onde a técnica apresentada baseava-se na previsão obtida por desagregação de vazões semanais “perfeitas”, isto é, médias dos sete dias de vazões diárias observadas para a semana a ser prevista. Para a desagregação, a modelagem utilizava técnicas de geração de cenários de sete dias para previsão de vazões. Neste trabalho foi possível medir o potencial da abordagem, tendo-se obtido resultados bastante promissores. A modelagem desenvolvida nesta tese apresenta esta mesma técnica de desagregação, porém desta vez fazendo uso de previsões “imperfeitas”. Nos estudos de caso, foram usadas as previsões de aflúncias semanais obtidas pelo modelo PREVIVAZ, (MACEIRA et. al., 1997) que são utilizadas no ONS – Operador Nacional de Sistema Elétrico, para o Planejamento de Curto Prazo da Operação Eletro-Energética do Sistema Hidrotérmico Brasileiro. Como técnica de geração de cenários, esta tese, assim como LIVINO DE CARVALHO (1999), usa seqüências sintéticas de vazões diárias obtidas por uma adaptação, descrita no apêndice A, do modelo DIANA, apresentado em KELMAN et. al. (1983).

I.4 Conteúdo dos Capítulos

O capítulo 2 apresenta a descrição metodológica da modelagem estocástica de previsão desenvolvido nesta tese, denominado modelo PREVIVAZH.

O capítulo 3 descreve os casos estudo analisados, todos eles correspondentes à aproveitamentos hidroelétricos. Na apresentação dos casos faz-se uma descrição das características fisiográficas e hidrológicas das bacias às quais pertencem os aproveitamentos estudados. Apresentam-se mapas das principais Bacias Hidrográficas Brasileiras e mapas individuais das bacias estudadas; feitos com o auxílio do Programa *ArcView*. Apresenta-se também breve caracterização das propriedades estatísticas das séries de vazões diárias estudadas e são apresentados alguns gráficos feitos com o auxílio do Programa *S-PLUS 2000*.

O capítulo 4 descreve e comenta os resultados obtidos nos casos analisados e apresenta gráficos feitos com o auxílio do Programa *Excel*.

O capítulo 5 apresenta as conclusões, recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

O capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas.

O Apêndice A apresenta a descrição do modelo DIANA e a adaptação adotada para geração condicionada dos segmentos sintéticos de vazão diária.

O Apêndice B apresenta modificações feitas nos dados de afluência diária ao Aproveitamento de Tucuruí devido a erros grosseiros encontrados no decorrer dos estudos desta tese.

Capítulo II

Desenvolvimento

II.1 Premissas

Conforme citado no Capítulo 1, a modelagem apresentada nesta tese – PREVIVAZH – é um modelo de previsão de vazões diárias de natureza estocástica, baseado na desagregação não paramétrica, em intervalos diários, das previsões semanais utilizadas na elaboração do Programa Mensal da Operação Energética (PMO). Vale ressaltar que as previsões semanais podem ser obtidas através de qualquer modelo de previsão. Neste estudo foi utilizada o modelo PREVIVAZ, porém existe a liberdade de utilizar qualquer modelo.

A metodologia adotada no PREVIVAZH baseia-se no Modelo DIANA de geração de séries sintéticas de vazões diárias, desenvolvido no CEPEL, para estudos hidrológicos de cheias que afetam o sistema hidroelétrico brasileiro. O modelo DIANA é um modelo de geração direta de séries sintéticas de vazão diárias, isto é, não gera séries de precipitações diárias, para então transformá-las em vazões; e foi desenvolvido de forma a superar os problemas que, em geral, as modelagens de vazões encontram quando consideram intervalos de tempo pequenos, por exemplo, o dia, tais como: as exageradas assimetrias e curtoses nos registros de vazões diárias, a forte sazonalidade e a diversidade dos ramos de ascensão e recessão das hidrógrafas, de forma que estas características marcantes e de difícil modelagem dos processos diários, estarão adequadamente consideradas na modelagem do PREVIVAZH. A metodologia de desagregação da previsão de vazão semanal adotada, justifica-se pela preservação das propriedades estatísticas a nível semanal, tornando possível os

estudos estratégicos e táticos relativos à Operação do Sistema Hidroelétrico Brasileiro³ (KELMAN,1987).

A utilização desta metodologia híbrida (geração direta de segmentos sintéticos de vazões diárias com desagregação de previsões de vazões médias semanais) resolve, ao mesmo tempo, os dois principais problemas apresentados por essas duas metodologias, quando utilizadas individualmente, que são: a desconsideração das previsões semanais, no caso da geração direta de segmentos sintéticos de vazões diárias e a desconsideração das informações existentes nas duas últimas vazões diárias observadas na previsão semanal (MÜLLER, 1997).

A modelagem PREVIVAZH, como já mencionada, será baseada no Modelo DIANA e, para tal, foi necessário adaptá-lo para condicionar a geração das seqüências sintéticas de vazões diárias às últimas vazões diárias observadas, ou seja, a primeira vazão dos segmentos sintéticos passa a não ser mais sorteada aleatoriamente da distribuição empírica das vazões iniciais, introduzindo-se a dependência desta vazão com as últimas vazões diárias observadas. Para tal, o módulo de geração do DIANA foi adaptado a esta condição e esta adaptação está descrita no Anexo A.

II.2 Descrição Metodológica da modelagem PREVIVAZH

II.2.1 Algoritmo Básico do PREVIVAZH

De forma bastante resumida, conforme descrito inicialmente em COSTA (1999), o algoritmo adotado no PREVIVAZH pode ser descrito por:

- Tomando-se como base o dia atual, $t = 0$; considera-se disponível a vazão prevista do PMO (Planejamento Mensal da Operação) para a semana que se inicia no dia $t =$

³ No planejamento estratégico o horizonte considerado pode ser de alguns anos e o intervalo de discretização do tempo não é usualmente inferior a um mês. No planejamento tático é preciso refinar as decisões da fase estratégica, levando em consideração as restrições à operação com curto prazo (com horizonte de dias ou horas).

1; denotada $qsem$. Considera-se também disponíveis as duas últimas vazões diárias observadas, referentes aos dias $t = -1$ e $t = 0$, ($qobs(-1)$ e $qobs(0)$).

- Gera-se com o Modelo DIANA, condicionado às duas últimas vazões diárias observadas $qobs(-1)$, $qobs(0)$, um conjunto de M segmentos sintéticos de 1 a 7 vazões diárias, dependendo do horizonte de previsão. Nesta tese adotou-se $M=10.000$

- Deste conjunto de M segmentos seleciona-se, em princípio, aquele segmento cuja vazão média seja mais próxima de $qsem$. Com efeito, LIVINO DE CARVALHO (1999) considerou a vazão média para a semana que se inicia já conhecida, e portanto, como $qsem$ não incluía erro, era razoável que a solução do segmento com as previsões das vazões dos dias $t=1,2,\dots,7$ tomasse como base esse valor de $qsem$. Ao utilizarmos uma previsão para o valor da vazão média semanal, temos que considerar a eventualidade desta previsão estar, de certa forma, incompatível com as duas últimas vazões diárias, indicando a possibilidade de um maior erro de previsão. A compatibilidade da previsão de vazão média semanal, com as duas últimas vazões diárias observadas, pode ser avaliada comparando-a com a distribuição da vazão média semanal dos M segmentos sintéticos gerados. Caso constatada a incompatibilidade, o valor de $qsem$ deveria ser atualizado. Atualizado ou confirmado o valor de $qsem$, ele é utilizado para selecionar um único segmento do conjunto de M segmentos sintéticos de vazões diárias, que será tomado como o conjunto de previsões para os próximos 7 dias. O item a seguir, detalha o procedimento desenvolvido para esta atualização da previsão de vazão semanal.

II.2.2 Atualização da Previsão de Vazão Semanal

O grau de discrepância entre $qsem$ e as afluências diárias observadas é avaliado localizando o valor de $qsem$ na distribuição de freqüência das M médias semanais:

$$\{\overline{QD}^m, m=1,\dots,M\} \quad (II.1)$$

Estas médias correspondem às médias aritméticas dos i dias ($i = 1,\dots,7$) de cada m conjuntos de segmentos sintéticos geradas pelo modelo DIANA condicionado.

A atualização da previsão $qsem$ é feita, ou não, obedecendo a critérios definidos a seguir:

Sejam os valores de vazões médias semanais obtidos na distribuição de frequência de \overline{QD}^m (a, b, QM, c, d), conforme a figura 1 a seguir, tais que:

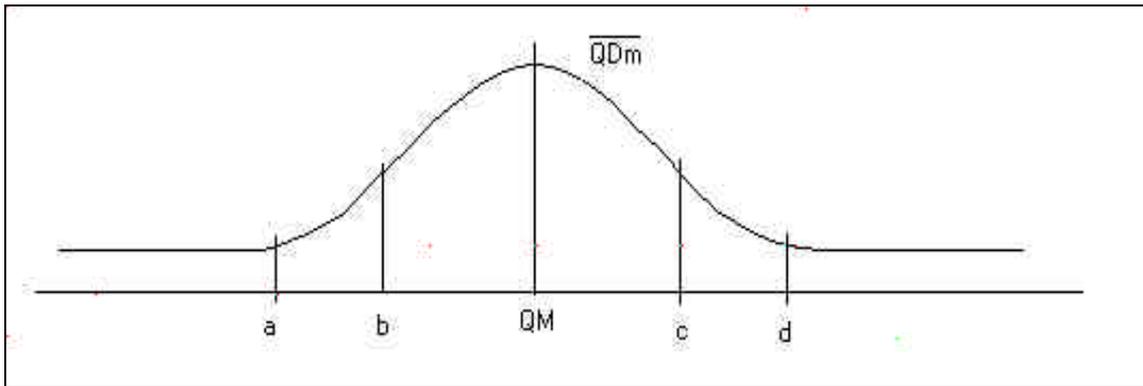


Figura 1 - Distribuição das frequências das M médias semanais, \overline{QD}^m .

$$\Pr[\overline{QD}^m \leq a] = \alpha_1, \quad (II.2)$$

$$\Pr[\overline{QD}^m \leq b] = \alpha_2, \quad (II.3)$$

$$QM = \sum_{i=1}^M \frac{\overline{QD}^m}{M} \quad (II.4)$$

$$\Pr[\overline{QD}^m \geq c] = \alpha_2, \quad (II.5)$$

$$\Pr[\overline{QD}^m \geq d] = \alpha_1 \quad (II.6)$$

onde α_1 e α_2 , são níveis de tolerância, tais que:

$$\alpha_1 \leq \alpha_2. \quad (II.7)$$

Sempre que o valor de $qsem$ estiver contido no intervalo $[b,c]$, considera-se que não há discrepância entre $qsem$ e as afluições diárias já ocorridas, e seleciona-se o segmento com média mais próxima de $qsem$, ou seja, não se atualiza $qsem$. Caso o valor de $qsem$ esteja fora deste intervalo, considera-se que há discrepância entre $qsem$ e as afluições diárias já ocorridas e segue-se o seguinte procedimento de atualização $qsem$:

- $qsem < [a,b) \Rightarrow$ o valor de média usado para seleção da seqüência sintética é obtido interpolando-se na reta definida pelos pontos (a, QM) e $(b, qsem)$, conforme apresentado na Figura 2. Isto é $qsem$ é atualizado pelo valor de $Qsemfinal$.

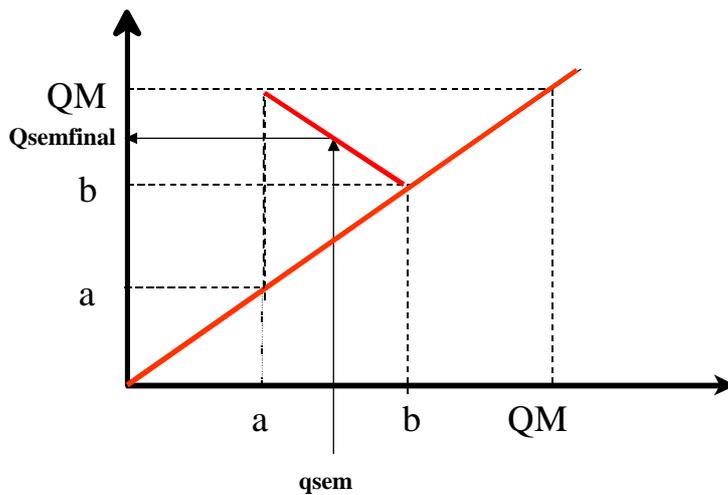


Figura 2 – Interpolação para $qsem < [a,b)$.

- $qsem < (c, d] \Rightarrow$ o valor da média semanal usado para seleção da seqüência sintética é obtido interpolando-se na reta definida pelos pontos $(c, qsem)$ e (d, QM) , conforme apresentado na Figura 3. Isto é $qsem$ atualizado pelo valor de $Qsemfinal$.

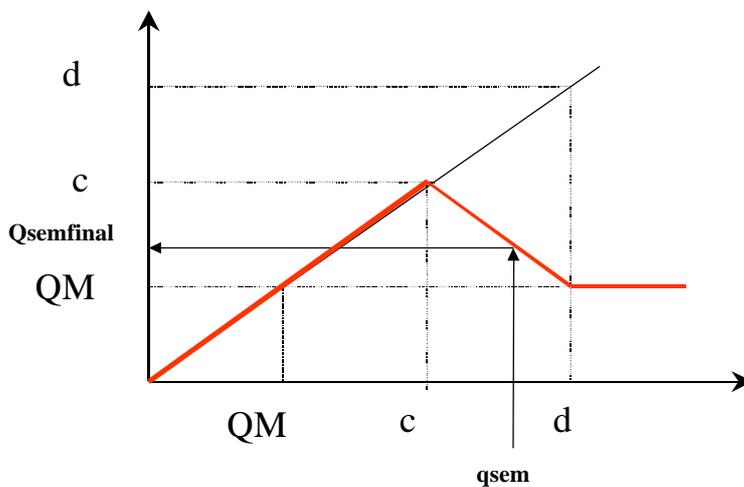


Figura 3 – Interpolação para $qsem < (c, d]$.

- $qsem > d$, ou $qsem < a$ e se $a_1 < a_2$ utiliza-se QM para seleção da seqüência sintética. Isto é $qsem$ é atualizado pelo valor de QM.

- $a_1 = a_2$, $qsem < a$, o valor de média usado para seleção da seqüência sintética é obtido interpolando-se na reta definida pelos pontos $(\min\{\overline{QD}^m, m=1,\dots,M\}, QM)$ e $(a, qsem)$.

- $a_1 = a_2$, $qsem > d$, o valor de média usado para seleção da seqüência sintética é obtido interpolando-se na reta definida pelos pontos $(\max\{\overline{QD}^m, m=1,\dots,M\}, QM)$ e $(d, qsem)$.

Inicialmente, conforme descrito em COSTA (2000), foi testado somente o valor 5% para α_1 e α_2 . No decorrer do estudo, novos pares de níveis de tolerância (a_1, a_2) foram testados para as diferentes séries de afluições diárias utilizadas e chegou-se à conclusão de que a escolha do melhor procedimento a adotar na atualização de $qsem$, varia de série para série e pode ser feita testando-se as seis opções da tabela 1 que foram consideradas nos estudos realizados nesta tese.

Tabela 1 – Opções testadas de atualização da previsão semanal e seus respectivos níveis de tolerância.

Opções de atualização	Níveis de tolerância
0	Sem atualização: a modelagem adota sempre $qsem$.
1	$a_1 = a_2 = 5\%$
2	$a_1 = 5\%$ e $a_2 = 10\%$
3	$a_1 = 10\%$ e $a_2 = 20\%$
4	$a_1 = 10\%$ e $a_2 = 25\%$
5	$a_1 = 10\%$ e $a_2 = 30\%$

Como pode ser observado nesta tabela, o intervalo central (entre b e c), vai estreitando com as diferentes opções de atualização, por exemplo, para a opção 1, este intervalo é de 90% e para a opção 5 este intervalo é de 40%. Conforme descrito anteriormente, este intervalo central pode ser entendido como um intervalo de confiança na previsão semanal inicial. Ao longo dos testes para diferentes séries

pertencentes a diferentes aproveitamentos, observou-se uma necessidade de estreitar esse intervalo de confiança chegando-se aos diferentes níveis de tolerância apresentados, portanto, nesta tabela.

II.2.3 Escolha da Opção de Atualização da Previsão Semanal

A metodologia de escolha da opção de atualização da previsão semanal, que servirá como parâmetro para a escolha do segmento de 7 dias de afluições diárias, consiste na obtenção de previsões para um número grande de semanas e na análise de oito estatísticas. A escolha da opção de atualização da previsão será feita priorizando os menores valores para este conjunto de estatísticas.

A definição destas estatísticas utiliza as seguintes variáveis:

a) Erro de previsão para o dia i da semana j

$$E_{i,j} = QD_{i,j} - QOBS_{i,j} \quad (II.8)$$

Onde:

$QD_{i,j}$: afluição prevista para o dia i da semana j

$QOBS_{i,j}$: afluição observada para o dia i da semana j

b) Erro relativo de previsão para o dia i da semana j

$$E^*_{i,j} = \frac{QD_{i,j} - QOBS_{i,j}}{QOBS_{i,j}} \quad (II.9)$$

c) Média das previsões da semana j

$$\overline{QM}_j = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 QD_{i,j} \quad (II.10)$$

d) Média das afluições observadas em uma semana j

$$MQOBS_j = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 QOBS_{i,j} \quad (II.11)$$

Seja N o número de anos analisados, as estatísticas analisadas são dadas por:

Estatísticas 1 a 7 (Ei): Média do erro relativo de previsão absoluto para a média de todos os dias da semana para as 52 semanas dos N-anos analisados.

$$E_i = \frac{1}{N} \frac{1}{52} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{52} E_{i,j,k}^* \quad , i = 1,7 \quad (II.12)$$

Estatística 8: Média do erro relativo de previsão absoluto semanal para cada uma das 52 semanas dos N anos analisados.

$$E_8 = \frac{1}{N} \frac{1}{52} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{52} \frac{\overline{QM}_{j,k} - MQOBS_{j,k}}{MQOBS_{j,k}} \quad (II.13)$$

Determinada a melhor opção de atualização da previsão de afluência semanal, a previsão de afluência diária poderá ser feita conforme descrito no item 2.2.

II.2.4 Correção da Tendenciosidade do Erro de Previsão Semanal

Quando escolhida a melhor opção de atualização da previsão semanal, como alternativa para melhorar a previsão, ainda pode ser aplicado um fator de correção da tendenciosidade da previsão semanal. Este fator é calculado a partir do valor escolhido como previsão semanal final, isto é depois de atualizado, ou não, conforme descrito no item 2.2.

Conforme será visto no Capítulo 3, durante a fase de testes para aplicação da modelagem foi adotado um procedimento de divisão das séries de dados em duas partes, a primeira para calibragem dos parâmetros da modelagem de geração e a segunda para calibragem da modelagem de previsão. Com esta última parte da série de dados é feita previsão para um grande número de dias e aferida a eficácia da modelagem (isto é, produzir previsões diárias com baixos erros).

O fator de correção da tendenciosidade da previsão semanal é calculado da seguinte forma, considerando várias previsões semanais geradas a partir do grande número de dias de previsões citados no parágrafo anterior:

Seja $qsemfinal$, valor da previsão semanal adotado para cálculo da previsão diária;

$fcorr_tend$: fator de correção correção da tendenciosidade da previsão semanal;

$$fcorr_tend = \frac{1}{\frac{\frac{1}{N} \frac{1}{52} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{52} qsemfinal_{j,k}}{\frac{1}{N} \frac{1}{52} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{52} MQOBS_{j,k}}} \quad (II.14)$$

Depois de calculado este valor e constatada a relevância da tendenciosidade⁴, este fator é multiplicado pelo valor de $qsemfinal$ em cada semana estudada e as previsões são feitas a partir deste valor corrigido.

II.2.5 Procedimento Para Previsão de Afluências Para Horizontes Menores que 7 Dias

Para realizar previsões para horizontes inferiores a 7 dias, um tratamento deve ser dado às afluências observadas no decorrer da semana a ser prevista, isto é, considerando que a previsão de afluências para horizontes de 7 dias é feita sempre no início de uma semana⁵, nenhuma informação adicional poderá influenciar na previsão, além das informações já fornecidas ao Modelo: previsão de afluência semanal e duas últimas afluências diárias observadas.

Porém, quando se deseja fazer previsão para um horizonte inferior a 7 dias dentro desta mesma semana, novas informações podem contribuir para uma melhora na qualidade das previsões, à saber: as afluências observadas no decorrer desta

⁴ Nesta tese, foram consideradas relevantes as tendenciosidade superiores a 1%, isto é fatores de correção maiores ou iguais que 1,01 ou inferiores a 0,99.

⁵ No caso do Planejamento da Operação de Curto Prazo do Setor Elétrico Brasileiro, feito pelo ONS – Operador Nacional do Sistema, esta semana sempre começa em um Sábado e vai até a próxima Sexta-feira e a previsão de afluências semanais é feita sempre na Quarta-feira.

semana, que podem indicar que a previsão de afluência semanal está muito descolada da realidade, levando a uma correção ou até à desconsideração da mesma. Para melhor entendimento desta situação, apresentamos a Tabela 2. Quanto maior o número de dias observados dentro da semana considerada, maior a influência sobre a previsão de afluência semanal. A medida desta influência, dos dias observados no decorrer da semana, na previsão da afluência semanal, é dada por um fator de correção aplicado à previsão de afluência semanal. A descrição do procedimento adotado neste caso é apresentada a seguir:

Tabela 2 – Procedimento de previsão para horizontes menores que 7 dias.

<i>MQOBS</i>		<i>qsem</i>						
<i>QOBS₋₁</i>	<i>QOBS₀</i>	<i>QOBS₁</i>	<i>QOBS₂</i>	<i>QOBS₃</i>	<i>QOBS₄</i>	<i>QOBS₅</i>	<i>QOBS₆</i>	<i>QOBS₇</i>
último dia da semana (H_7)								
<i>MQOBS</i>		<i>qsem</i>						
<i>QOBS₋₂</i>	<i>QOBS₋₁</i>	<i>QOBS₀</i>	<i>QOBS₁</i>	<i>QOBS₂</i>	<i>QOBS₃</i>	<i>QOBS₄</i>	<i>QOBS₅</i>	<i>QOBS₆</i>
primeiro dia da semana (H_6)								
<i>MQOBS</i>		<i>qsem</i>						
<i>QOBS₋₃</i>	<i>QOBS₋₂</i>	<i>QOBS₋₁</i>	<i>QOBS₀</i>	<i>QOBS₁</i>	<i>QOBS₂</i>	<i>QOBS₃</i>	<i>QOBS₄</i>	<i>QOBS₅</i>
segundo dia da semana (H_5)								
<i>MQOBS</i>		<i>qsem</i>						
<i>QOBS₋₄</i>	<i>QOBS₋₃</i>	<i>QOBS₋₂</i>	<i>QOBS₋₁</i>	<i>QOBS₀</i>	<i>QOBS₁</i>	<i>QOBS₂</i>	<i>QOBS₃</i>	<i>QOBS₄</i>
terceiro dia da semana (H_4)								
<i>MQOBS</i>		<i>qsem</i>						
<i>QOBS₋₅</i>	<i>QOBS₋₄</i>	<i>QOBS₋₃</i>	<i>QOBS₋₂</i>	<i>QOBS₋₁</i>	<i>QOBS₀</i>	<i>QOBS₁</i>	<i>QOBS₂</i>	<i>QOBS₃</i>
quarto dia da semana (H_3)								
<i>MQOBS</i>		<i>qsem</i>						
<i>QOBS₋₆</i>	<i>QOBS₋₅</i>	<i>QOBS₋₄</i>	<i>QOBS₋₃</i>	<i>QOBS₋₂</i>	<i>QOBS₋₁</i>	<i>QOBS₀</i>	<i>QOBS₁</i>	<i>QOBS₂</i>
quinto dia da semana (H_2)								
<i>MQOBS</i>		<i>qsem</i>						
<i>QOBS₋₇</i>	<i>QOBS₋₆</i>	<i>QOBS₋₅</i>	<i>QOBS₋₄</i>	<i>QOBS₋₃</i>	<i>QOBS₋₂</i>	<i>QOBS₋₁</i>	<i>QOBS₀</i>	<i>QOBS₁</i>
sexto dia da semana (H_1)								

Adotando as seguintes considerações:

- ✓ Horizonte de previsão: H_k , $k = 1,7$; onde k = número de dias de previsão;
- ✓ Valor da previsão de afluência semanal previsto pelo PREVIVAZ como *qsem* ;

- ✓ Novo valor de previsão de afluência semanal corrigido: $qsemcorr$;
- ✓ Fator de correção utilizado para corrigir a previsão como $fator$;
- ✓ Dias observados na semana considerada $QOBS_i$, $i = 0, -1, -2, -3, -4, -5, -6$
- ✓ $MQOBS$, afluência semanal observada
- ✓ $QOBS_i$: $i=1,2,3,\dots$ previsões de afluências diária fornecidas pelo PREVIVAZH

Obtemos o seguinte procedimento para correção da previsão da afluência semanal para cada diferente horizonte de previsão t :

$$H_6 : fator = \frac{QOBS_0}{qsem} e \quad (II.15)$$

$$qsemcorr = \left(\frac{(qsem \times 7) - QOBS_0}{6} \right) \times C \quad (II.16)$$

$$H_5 : fator = \frac{\frac{QOBS_0 + QOBS_{-1}}{2}}{qsem} e \quad (II.17)$$

$$qsemcorr = \left(\frac{(qsem \times 7) - QOBS_0 - QOBS_{-1}}{5} \right) \times C \quad (II.18)$$

$$H_4 : fator = \frac{\frac{QOBS_0 + QOBS_{-1} + QOBS_{-2}}{3}}{qsem} e \quad (II.19)$$

$$qsemcorr = \left(\frac{(qsem \times 7) - QOBS_0 - QOBS_{-1} - QOBS_{-2}}{4} \right) \times C \quad (II.20)$$

$$H_3 : fator = \frac{\frac{QOBS_0 + QOBS_{-1} + QOBS_{-2} + QOBS_{-3}}{4}}{qsem} e \quad (II.21)$$

$$qsemcorr = \left(\frac{(qsem \times 7) - QOBS_0 - QOBS_{-1} - QOBS_{-2} - QOBS_{-3}}{3} \right) \times C \quad (II.22)$$

$$H_2 : fator = \frac{QOBS_0 + QOBS_{-1} + QOBS_{-2} + QOBS_{-3} + QOBS_{-4}}{5} e \quad (II.23)$$

$$qsemcorr = \left(\frac{(qsem \times 7) - QOBS_0 - QOBS_{-1} - QOBS_{-2} - QOBS_{-3} - QOBS_{-4}}{2} \right) \times C \quad (II.24)$$

$$H_1 : fator = \frac{QOBS_0 + QOBS_{-1} + QOBS_{-2} + QOBS_{-3} + QOBS_{-4} + QOBS_{-5}}{6} e \quad (II.25)$$

$$qsemcorr = ((qsem \times 7) - QOBS_0 - QOBS_{-1} - QOBS_{-2} - QOBS_{-3} - QOBS_{-4} - QOBS_{-5}) \times C \quad (II.26)$$

Onde C é uma constante que assume os seguintes valores:

- Para média dos últimos dias observados maior que a previsão semanal: C = fator
- Para média dos últimos dias observados menor que a previsão semanal: C = 1/fator

É importante ressaltar que o resultado desta correção da previsão de afluência semanal pode apresentar um resultado negativo, o que deve ser evitado, portanto existe um tratamento para este caso, que consiste em desconsiderar a correção e utilizar a previsão semanal de afluência, sem correção.

Com *qsemcorr* como o novo valor para a afluência semanal prevista, volta-se ao terceiro item descrito em II.1, para previsão das afluências diárias e seleciona-se aquele segmento cuja vazão média seja mais próxima de *qsemcorr*.

Capítulo III

Aplicação

III.1 Características Hidro-Energéticas dos Aproveitamentos Analisados

Pode-se considerar atualmente no Brasil a existência de dois grandes sistemas de geração de energia elétrica interconectados, o Sistema Sul-Sudeste e o Sistema Norte-Nordeste. Nesta tese houve a preocupação de utilizar séries de vazões históricas diárias, que representassem diferentes Bacias destes principais Sistemas. Assim foram analisadas séries de vazões históricas diárias afluentes a dois aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Sul-Sudeste: Jupιά e Foz do Areia, o primeiro localizado no Sub-sistema Sudeste e segundo no Sub-sistema Sul; e a dois aproveitamentos do Sistema Norte-Nordeste: Tucuruí e Sobradinho, o primeiro localizado no Sub-sistema Norte e o segundo no Sub-sistema Nordeste.

Além disto, podemos considerar que a escolha das séries de vazões históricas diárias afluentes procurou abranger as principais Bacias Hidrográficas brasileiras apresentadas na Figura 4 a seguir:



Figura 4 - Principais Bacias Hidrográficas Brasileiras.

III.1.1 Sub-Sistema Sul

A série representativa do Sub-Sistema Sul é a série de vazões diárias afluentes ao aproveitamento hidrelétrico Foz do Areia (Bento Munhoz da Rocha Neto) – código 10000074, pertencente à COPEL e operada pela mesma companhia. O Posto Fluviométrico, cujo código DNAEE é 65774403, está localizado no Rio Iguaçu, Estado do Paraná, a uma latitude S 26:00:34 e longitude W 51:39:53. A localização deste aproveitamento poderá ser melhor visualizada na Figura 5.

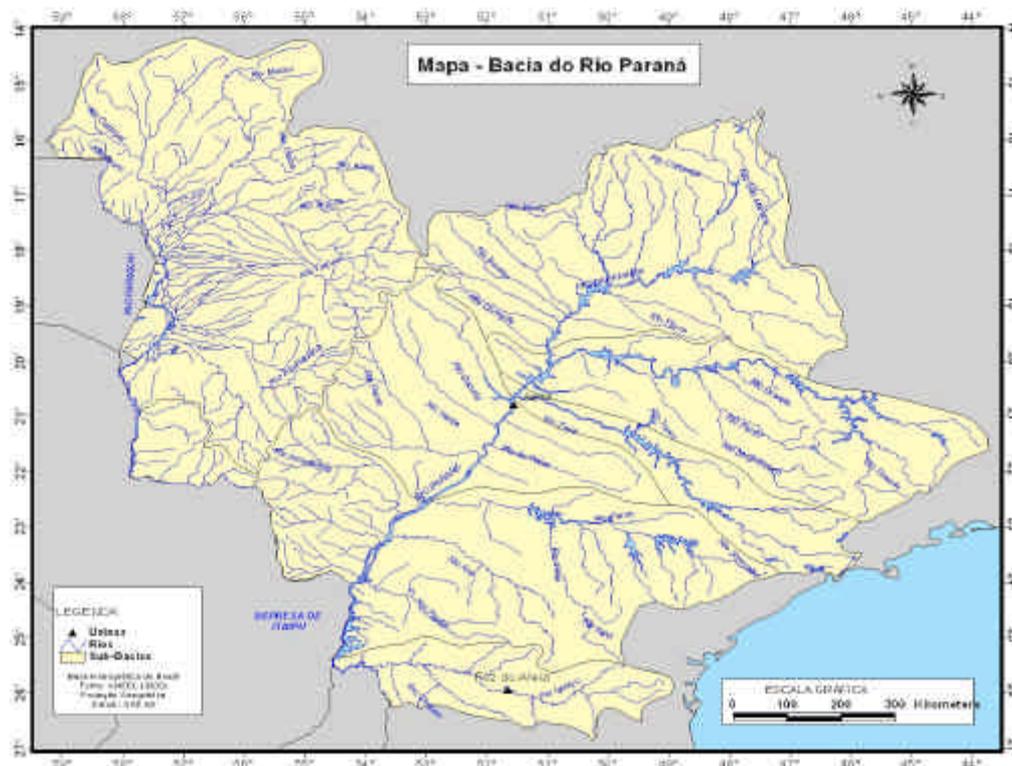


Figura 5 - Bacia do Rio Paraná e Sub-bacia do Rio Iguaçu. Destacados os aproveitamentos de Foz do Areia e Jupuí.

O Rio Iguaçu nasce na Serra do Mar, nas vizinhanças de Curitiba, e se desenvolve no sentido leste-oeste, numa extensão de 1300km. A última de suas quedas denomina-se Cataratas do Iguaçu, tem 82 m de altura e dista 23 Km da confluência com o Paraná. Até sua foz drena uma área da ordem de 69 000 km², e a sua contribuição média é de 1400 m³/s. (ANEEL, 1999)

O rio Iguaçu junta-se ao alto Paraná cerca de 130 km a jusante de Porto Mendes, num ponto onde convergem território do Brasil, do Paraguai e da Argentina.

A área de drenagem do Rio Iguaçu é de 29.900 km². A vazão MLT é de 631,68m³/s. A energia firme é de 4.706,66GWh e a Potência Efetiva é de 1.676,00MW. (ELETROBRÁS, 2001)

III.1.2 Sub-Sistema Sudeste

A série representativa do Sub-Sistema Sudeste é a série de vazões diárias afluentes ao aproveitamento hidrelétrico Jupuí (Souza Dias) – código 10000045, pertencente à CESP (Companhia Energética de São Paulo) e operada pela mesma companhia. O

Posto Fluviométrico cujo código DNAEE é 63007080 está localizado no Rio Paraná, na divisa entre os Estados de Mato Grosso e São Paulo, a uma latitude S 20:47:00 e longitude W 51:38:00. A localização deste aproveitamento poderá ser melhor visualizada na Figura 5.

A bacia do rio Paraná localiza-se, quase que integralmente, entre os paralelos 2º e 18º e os meridianos de longitude oeste 46º e 56º. Possui uma vazão média anual de 15.620 m³/s, volume médio anual de 495 Km³ e uma área de drenagem de 1.237.000Km², formada por 8 sub-bacias. A região drenada pelo rio Paraná insere-se, quase totalmente, em zona de clima tropical, com exceção de pequenas extensões, onde se registram variações em torno do tipo subtropical temperado.

A área da bacia, abrange territórios dos Estados de Mato Grosso, Paraná, São Paulo e partes dos Estados de Minas Gerais e Goiás. Geograficamente limita-se com as seguintes bacias hidrográficas brasileiras: com a Bacia Amazônica, ao norte, Bacia do Tocantins-Araguaia, Bacia do Rio São Francisco, a noroeste, Bacia do Atlântico Trecho Leste, a sudeste, com a Bacia do Uruguai, ao sul; como pode ser visto na Figura 4.

Grande parte da área da Bacia do Paraná está na região sudeste do Brasil. O rio Paraná, juntamente com os seus tributários, forma o maior dos sistemas fluviais que deságuam no estuário do rio da Prata. Seu curso tem 4000 Km e é, portanto, o terceiro rio em extensão nas Américas, depois do Amazonas e do Mississipi. O rio Paraná, propriamente dito, se estende desde a confluência dos rios Grande e Paranaíba, na latitude 20º S, até sua desembocadura no rio da Prata. No trecho que vai da confluência dos rios Grande-Paranaíba até a sua junção com o Paraguai, 2800 Km a jusante, o rio é denominado como Alto Paraná.

Como os principais formadores do rio Paraná, podemos destacar o rio Grande, que nasce na Serra da Mantiqueira e se desenvolve ao longo de 1300Km, no sentido leste-oeste, numa bacia cuja área é de 143000 Km² e contribui com 2100m³/s. O rio Paranaíba é formado por muitos afluentes, dos quais o mais setentrional é o São Bartolomeu, que nasce na Serra dos Pirineus, nas proximidades de Brasília. A área hidrográfica da bacia do rio Paranaíba é de 222000 Km², e a sua contribuição média é de 3000m³/s. O curso inicial do Alto Paraná segue o rumo sudoeste, ao longo de uma dobra profunda no Maciço brasileiro, até alcançar a Serra do. Nesse trecho inicial, recebe muitos tributários em ambas as margens. Destes, os mais importantes são o

Tietê, o Paranapanema e o Iguaçu, todos pela margem esquerda. Da confluência do Paranapanema até a cidade de Guaíra, o rio Paraná recebe outros afluentes menores, destacando-se os rios Ivaí e Piquiri pela margem esquerda e os rios Ivinheima, Amambaí e Iguatemi pela margem direita.

Em Passo da Pátria o Alto Paraná recebe, pela margem direita, o seu maior afluente, o rio Paraguai. Daí em diante o Paraná se desenvolve em território argentino, e ao passar por Corrientes toma o rumo do sul, transformando-se então num típico rio de planície, com barrancas formadas por seus próprios aluviões e com extensas várzeas inundáveis.

O período de águas altas é marcante durante o verão (novembro – fevereiro), e o de águas baixas vai de agosto a setembro. Um aspecto importante é que as vazões máximas do Alto Paraná e do Paraguai ocorrem em épocas diferentes. A bacia montanhosa do alto Paraná drena-se rapidamente de modo que o nível da água em Corrientes começa a subir em novembro e atinge seu máximo, nesse local, em fevereiro. Por outro lado, o Pantanal do Alto Paraguai retém e represa as águas de tal maneira que a contribuição do Paraguai só atinge Corrientes no período maio a junho. (ANEEL, 1999).

A área de drenagem do aproveitamento de Jupirá é de 470.000 km². A vazão MLT é de 6.297,79m³/s. A energia firme é de 7.752,60GWh e a Potência Efetiva é de 1.551MW com reservatório de 330 km² (ELETROBRÁS, 2001).

III.1.3 Sub-Sistema Nordeste

A série representativa do Sub-Sistema Nordeste é a série de vazões afluentes ao aproveitamento hidrelétrico de Sobradinho – código 10000168, pertencente à CHESF e operada pela mesma companhia. O Posto Fluviométrico cujo código DNAEE é 47750080 está localizado no Rio São Francisco, estado da Bahia, a uma latitude S 09:25:00 e longitude W 40:50:00. A localização deste aproveitamento poderá ser melhor visualizada na Figura 6.



Figura 6 - Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, destacado o aproveitamento hidrelétrico de Sobradinho.

Quatro das grandes hidrelétricas do Sistema Norte-Nordeste estão instaladas no rio São Francisco. O Rio São Francisco corre de sul para norte, reunindo as águas captadas nas úmidas cabeceiras do Brasil Central, por um longo percurso (2.700km), através de uma ampla região, árida onde a evaporação potencial excede a precipitação. No centro desta região criou-se um grande reservatório, Sobradinho, com uma capacidade de armazenamento de 28,60 km³.

A área da bacia do Rio São Francisco abrange partes do território dos seguintes estados: Minas Gerais, Bahia, Pernambuco e Alagoas. A mesma está compreendida entre as latitudes 7° 00' e 21° 00' S e longitudes 35° 00' e 47° 40' W. A grande extensão da bacia do São Francisco propicia a ocorrência de três tipos predominantes de clima: tropical úmido, nos planaltos interiores; tropical semi-árido, nas planícies sertanejas do Médio e Submédio São Francisco e tropical semi-úmido, na região costeira.

A bacia do rio São Francisco possui uma vazão média anual de 3.360m³/s, volume médio anual de 106Km³ e uma área de drenagem de 631.000Km², que representa 7,5% do território nacional, onde 83% da área da bacia distribuem-se nos Estados de

Minas Gerais e Bahia, 16% nos Estados de Pernambuco, Alagoas e Sergipe , e o restante 1% no Estado de Goiás e Distrito Federal.

O rio São Francisco é o mais importante da bacia, com uma extensão de 2.700 Km, tem suas nascentes na Serra da Canastra, em Minas Gerais.. Atravessando a longa depressão encravada entre o Planalto Atlântico e as Chapadas do Brasil Central, segue a orientação sul-norte, até aproximadamente a cidade de Barra, dirigindo-se então para Nordeste, até atingir a cidade de Cabrobó, quando inflete para Sudeste, para desembocar no Oceano Atlântico. A sua importância se deve, não só ao volume de água transportado numa região semi-árida mas, principalmente, à sua contribuição histórica e econômica na fixação das populações ribeirinhas e na criação das cidades hoje plantadas ao longo do vale, bem como ao potencial hídrico passível de aproveitamento em futuros planos de irrigação dos excelentes solos situados à sua margem.

O rio São Francisco descarrega no Oceano Atlântico, em média, mais de 90 bilhões de metros cúbicos de água drenada em extensas regiões de características hidrológicas distintas. Possui 36 tributários principais, dos quais apenas 19 são perenes, destacando-se, entre estes, pela margem direita, os rios Paraopeba, das Velhas e Verde Grande e , pela margem esquerda, os rios Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente e Grande. As áreas de drenagem destes afluentes, com exceção da do rio Verde Grande, estão situadas na região da bacia não abrangida pelo Polígono das Secas e , embora representem apenas cerca de 50% da área total da bacia, são responsáveis por 85% dos deflúvios de estiagem e 74% dos deflúvios máximos da bacia, que ocorrem na seção de Traipu. Esta distribuição irregular das disponibilidades hídricas superficiais são motivadas pela conjugação de fatores hidrológicos, meteorológicos e geológicos, responsáveis também pelas secas periódicas, que assolam extensas porções das partes média e setentrional da bacia.

Um balanço preliminar das chuvas, indica que, dos volumes precipitados na bacia, em média, 84% são consumidos pela evaporação e evapotranspiração, 11% se escoam através dos cursos d'água e 5% vão realimentar os aquíferos. (ANEEL, 1999).

A área de drenagem ao aproveitamento de Sobradinho é de 498.425 km². A vazão MLT é de 2.800,45m³/s. A energia firme é de 4.759,31GWh e a Potência Efetiva é de 1.050,00MW. (ELETROBRÁS, 2001).

III.1.4 Sub-Sistema Norte

A série representativa do Sub-Sistema Norte é a série de vazões afluentes ao aproveitamento hidrelétrico de Tucuruí – código 10000275, pertencente à ELETRONORTE e operada pela mesma companhia. O Posto Fluviométrico cujo código DNAEE é 29680080 está localizado no Rio Tocantins, estado do Pará, a uma latitude S 03:45:03 e longitude W 49:40:03. . A localização deste aproveitamento poderá ser melhor visualizada na Figura 7.

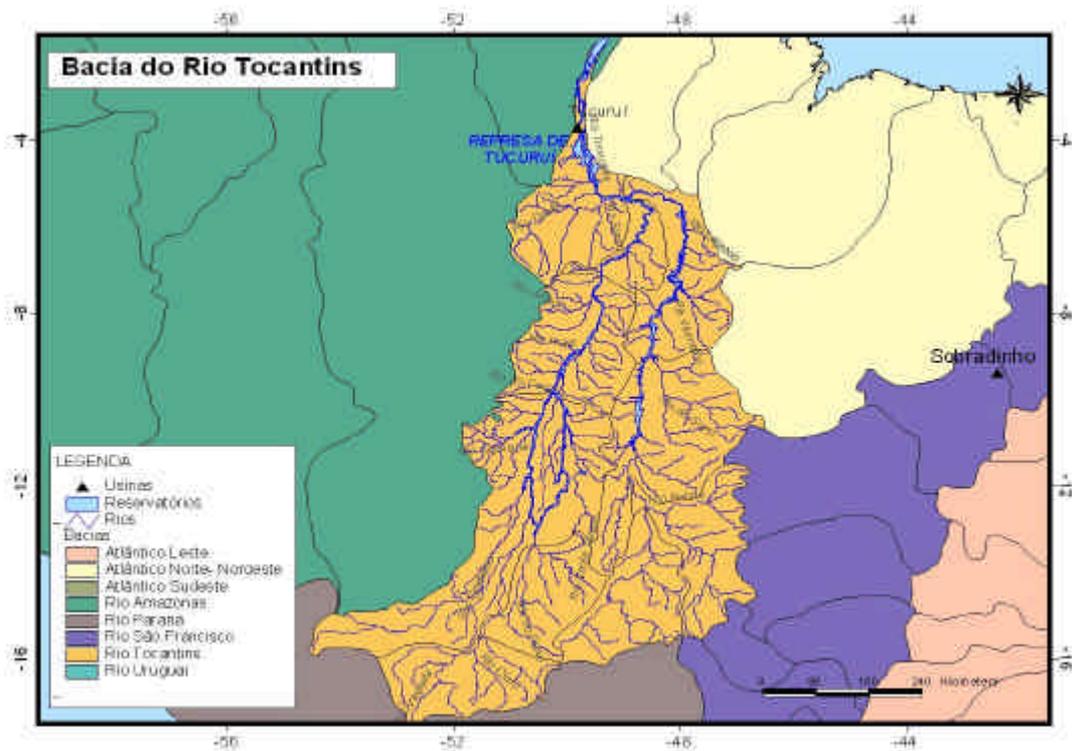


Figura 7 - Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins, em destaque o aproveitamento hidroelétrico de Tucuruí.

O Rio Tocantins, cuja extensão total é de aproximadamente 2.500 Km, se forma a partir dos rios das Almas e Maranhão, cujas cabeceiras localizam-se no Planalto de Goiás, a mais de 1.000m de altitude, na região mais central do Brasil. Seus principais tributários, até sua confluência com o Araguaia, são, de montante a jusante, os rios Bagagem, Tocantinszinho, Paranã, Manoel Alves de Natividade, do Sono, Manoel Alves Grande e Farinha, pela margem direita e Santa Tereza, pela margem esquerda.

A bacia do Tocantins -Araguaia localiza-se, quase que integralmente, entre os paralelos 2º e 18º e os meridianos de longitude oeste 46º e 56º. Sua configuração se apresenta alongada no sentido Sul-Norte, seguindo as diretrizes dos dois importantes

eixos fluviais – o Tocantins e o Araguaia – que se unem no extremo setentrional da Bacia, formando o Baixo Tocantins, que desemboca no Rio Pará, pertencente ao estuário do rio Amazonas. Esta bacia possui uma vazão média anual de $10.900\text{m}^3/\text{s}$, volume médio anual de 344 Km^3 e uma área de drenagem de 767.000Km^2 , que representa 7,5% do território nacional, distribuída nos Estados de Tocantins e Goiás (58%), Mato Grosso (24%); Pará (13%) e Maranhão (4%), além do Distrito Federal (1%). Limita-se com bacias de alguns dos maiores rios do Brasil, ou seja, ao Sul com a do Paraná, a Oeste, com a do Xingu e a leste, com a do São Francisco. Grande parte de sua área está na região Centro Oeste, desde as nascentes dos rios Araguaia e Tocantins até sua confluência, na divisa dos estados de Goiás, Maranhão e Pará. Desse ponto, para jusante a bacia hidrográfica entra na região Norte e se restringe a apenas um corredor formado pelas áreas marginais do rio Tocantins.

A grande extensão da bacia do Tocantins está relacionada há uma configuração alongada longitudinalmente e à sua continentalidade, e também à constância das massas de ar de natureza equatorial continental, quentes e úmidas, que estão associadas à zona intertropical de convergência. Esses fatores determinam uma relativa homogeneidade climato-meteorológica, caracterizada pela repetição das estações, ao longo dos anos, com variações pouco significativas quanto à temperatura, precipitação, umidade atmosférica, insolação, velocidade dos ventos e demais parâmetros climáticos. Esta bacia possui um regime hidrológico bem definido. Apresenta um período de estiagem que culmina em setembro/ outubro e um período de águas altas, onde as maiores cheias se verificam entre fevereiro e abril. No rio Tocantins, os valores máximos são observados, anualmente, em fevereiro/março, e no Araguaia em março/abril. Tal fato se explica pelo amortecimento experimentado pela onda de cheia na grande planície da Ilha do Bananal, retardando assim o seu pico.

A vazão média da bacia é estimada em $10.950\text{ m}^3/\text{s}$, sendo a contribuição do rio Araguaia em torno de $5.500\text{m}^3/\text{s}$, a do Itacaiúnas de $450\text{m}^3/\text{s}$ e a do Tocantins, antes de sua confluência com o Araguaia, de $5.000\text{ m}^3/\text{s}$. No rio Tocantins, a vazão específica média decresce até Porto Nacional (Goiás), aumentando a seguir, até sua confluência com o rio Araguaia, em virtude da elevada contribuição dos seus afluentes da margem direita.

É importante destacar a homogeneidade da distribuição das chuvas sobre a bacia e o fato de que aproximadamente 30% da água precipitada se escoam através dos cursos d'água. (ANEEL, 1999).

A área de drenagem da Bacia do Rio Tocantins é de 758.000 km². A vazão MLT é de 11.086,30m³/s. A energia firme é de 23.082,79 GWh e a Potência Efetiva é de 4.200,00MW. (ELETROBRÁS, 2001)

III.2 Caracterização Estatística das Séries de Vazões Estudadas

As séries de aflúncias diárias estudadas nesta tese foram fornecidas pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico e são as séries de vazões diárias utilizadas no planejamento da operação do sistema.

As séries de vazões afluentes aos Aproveitamentos de Jupia, Tucuruí e Foz do Areia são de aflúncias totais naturais, enquanto que as vazões afluentes ao aproveitamento de Sobradinho são incrementais calculadas a partir de Três Marias.

A seguir é apresentada a Tabela 3 contendo o número de anos e as estatísticas básicas para cada uma das séries de aflúncias diárias estudada.

Tabela 2 – Características das séries de vazões diárias afluentes aos aproveitamentos de Foz do Areia, Jupia, Sobradinho e Tucuruí.

	Foz do Areia	Jupia	Sobradinho	Tucuruí
Período de observação da Série	31 anos, de 1969 a 1999	50 anos, de 1950 a 1999	71 anos, de 1931 a 1999	51 anos, de 1949 a 1999
Média (m³/s)	754	6463	2033	10598
Desvio Padrão (m³/s)	668	4007	1552	9522
Valor máximo (m³/s)	8358 (09/07/83)	32813 (05/02/83)	14744 (11/03/79)	68400 (03/03/80)
Valor mínimo (m³/s)	64 (05/05/82)	1221 (02/01/64)	436 (01/11/54)	950 (21/09/93)

A figura 6 a seguir apresenta a legenda com as estatísticas contidas nos gráficos *Box-and-Whiskers*.

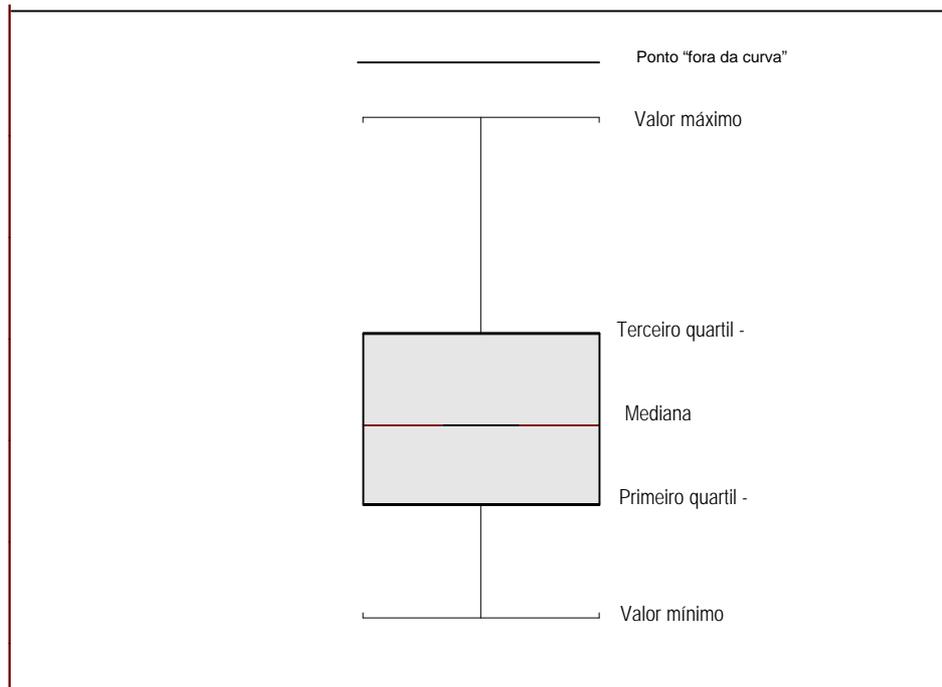


Figura 8 - Legenda das informações presentes nos gráficos Box-and-Whiskers apresentados nas figuras 8 a 11 para as vazões semanais afluentes aos quatro aproveitamentos estudados nesta tese.

A seguir serão apresentadas quatro figuras com gráficos elaborados com o *Software S-PLUS 2000*, que têm por objetivo ilustrar as séries históricas afluentes aos postos estudados. Nestes gráficos foram analisadas as séries de aflúências semanais aos quatro aproveitamentos, com efeito, o valor de cada semana na série semanal apresenta a média dos 7 valores diários para a dada semana na série diária.

Na Figura 9, apresentada a seguir, para o aproveitamento de Jupuíá, pode-se observar a sazonalidade marcante, ocorrendo vazões mais baixas entre as semanas 22 e 47 (meses de junho a novembro), período de estiagem na Bacia do Paraná, especialmente no mês de agosto (semana 33) que apresenta valores em torno de 2000 m³/s. Já para os meses de janeiro e fevereiro (semanas 1 a 10), observa-se os maiores valores do históricos. Nota-se ainda que no período seco a variabilidade é significativamente menor que no período úmido.

Na Figura 10, apresentada a seguir, para o aproveitamento de Foz do Areia, pode-se inferir uma fraca sazonalidade com comportamento inverso ao do aproveitamento de Jupuíá, isto é, período chuvoso no inverno (entre as semanas 19 e 42), e seco no verão, entre os meses de novembro a abril. Uma característica marcante é a grande

variabilidade ao longo de todo o ano, muito maior que a variabilidade das afluições a Jupirá, mesmo em seu período chuvoso.

Na Figura 11, apresentada a seguir, para o Aproveitamento de Tucuruí, pode-se observar uma forte sazonalidade (maior que a das afluições a Jupirá), com valores baixos entre as semanas 24 a 47, meses maio a outubro. Já entre as semanas 50 e 17 (meses dezembro a abril), os valores são altos. Observa-se também no período seco que a variabilidade é significativamente menor que no período úmido, sendo este comportamento mais acentuado que nas afluições a Jupirá.

Na Figura 12, apresentada a seguir, para o Aproveitamento de Sobradinho, pode-se observar a sazonalidade bem definida (menos que Tucuruí) com vazões baixas entre as semanas 25 e 42 (meses junho a outubro) e valores mais altos entre os meses de novembro a abril. Observa-se também no período seco que a variabilidade é significativamente menor que no período úmido, sendo este comportamento mais acentuado que nas afluições a Jupirá e menos que nas afluições a Tucuruí.

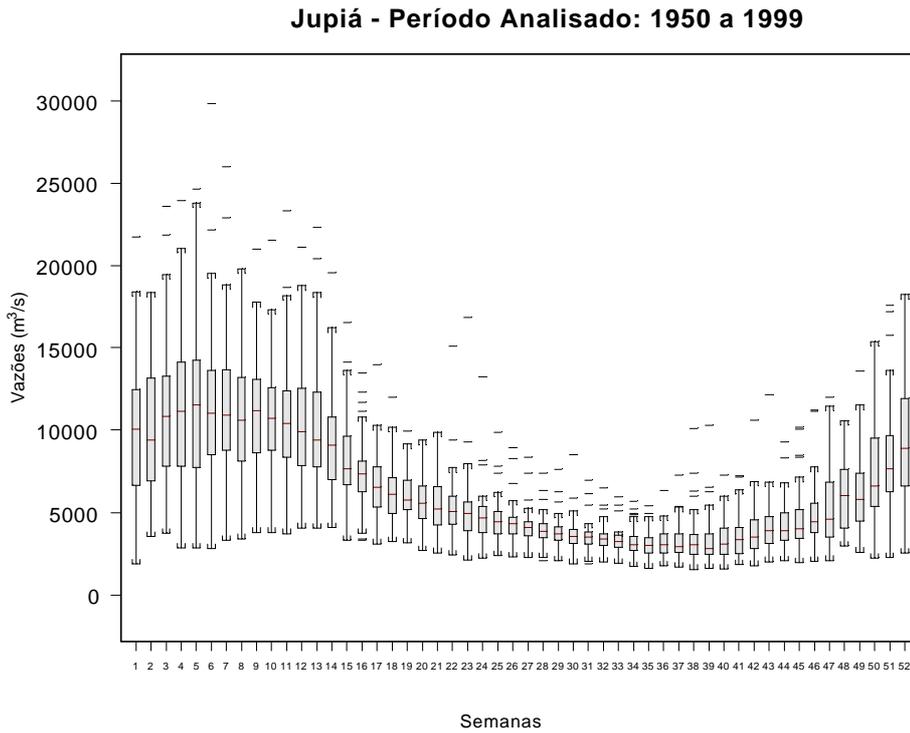


Figura 9 - Gráfico *Box-and-Whiskers* com a análise das afluências semanais ao Aproveitamento de Jupiá.

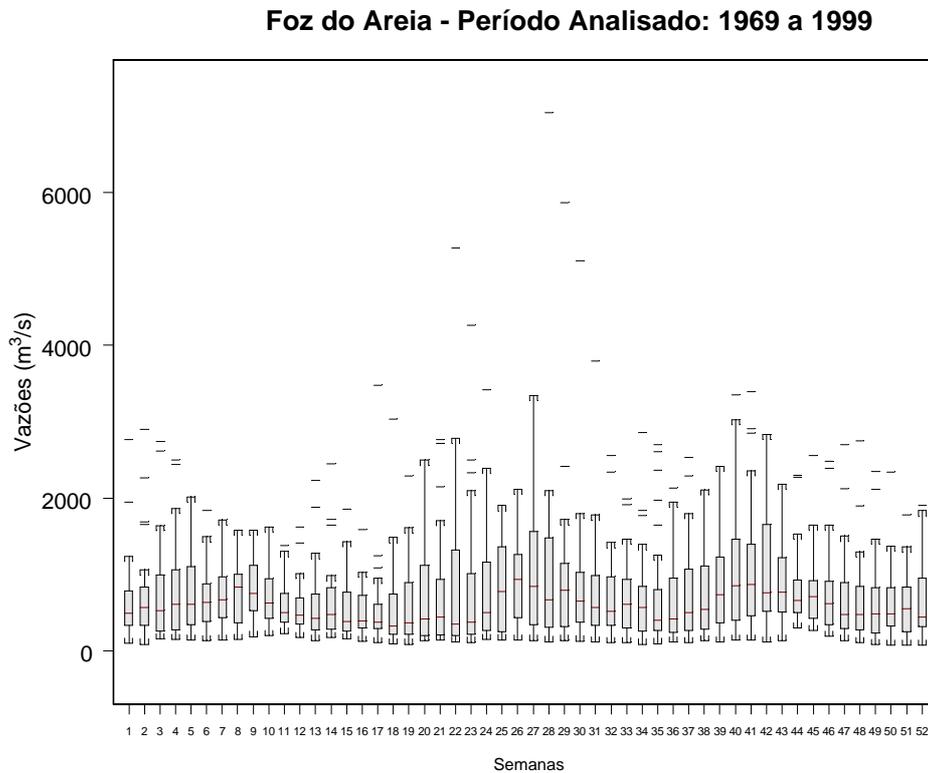


Figura 10 - Gráfico *Box-and-Whiskers* com a análise das afluências ao Aproveitamento de Foz do Areia.

Tucuruí - Período Analisado: 1949 a 1999

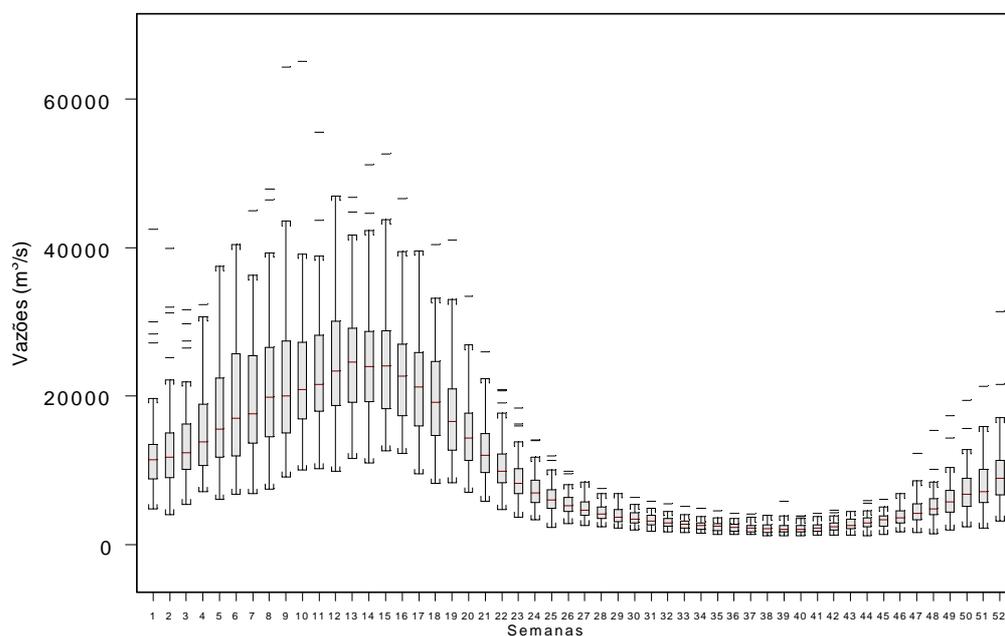


Figura 11 - Gráfico *Box-and-Whiskers* com a análise das aflúências ao Aproveitamento de Tucuruí.

Sobradinho - Período Analisado: 1931 a 1999

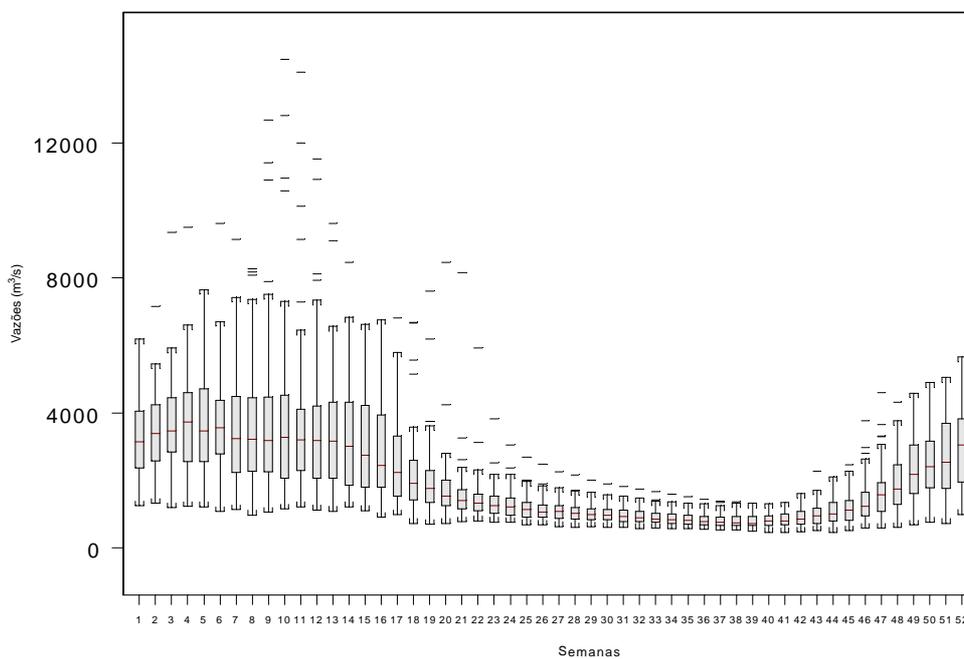


Figura 12 - Gráfico *Box-and-Whiskers* com a análise das aflúências ao Aproveitamento de Sobradinho.

Capítulo IV

Resultados

IV.1 Calibração da modelagem

Por calibração da modelagem entende-se a escolha da Opção de Atualização das Previsões Semanais e Definição da Correção da tendenciosidade das Previsões Semanais.

Inicialmente a série de dados foi dividida em duas partes, sendo a primeira para estimação dos parâmetros do modelo de geração e do modelo de previsão semanal e a segunda para ajuste dos parâmetros do modelo de previsão (melhor opção de atualização semanal, aplicação do fator de correção da tendenciosidade e o seu valor). A Tabela 3 a seguir apresenta o período estudado para cada uma das séries de vazões afluentes aos aproveitamentos.

Tabela 3 – Período estudado para cada uma das séries de vazões afluentes aos aproveitamentos.

JUPIÁ	1950 a 1984 – estimação 1985 a 1999 – ajuste
FOZ DO AREIA	1969 a 1988 – estimação 1989 a 1998 – ajuste
TUCURUÍ	1949 a 1984 – estimação 1985 a 1999 – ajuste
SOBRADINHO	1931 a 1984 – estimação 1985 a 1999 – ajuste

A obtenção dos parâmetros de previsão diária é feita da seguinte forma:

- A partir do período selecionado para ajuste, é feita a previsão para todos dias de cada ano deste período e verificado os erros relativos de previsão,

- Com esses erros calculam-se médias diárias (para os sete dias da semana) e médias semanais.
- Os parâmetros finais são obtidos a partir dos menores erros médios alcançados em cada uma das etapas.

Esse processo de ajuste será detalhado nos itens a seguir.

IV.1.1 Escolha da Opção de Atualização das Previsões Semanais

Inicialmente para os quatro casos estudados foi feita uma análise das previsões das aflúncias semanais, uma vez que a escolha da opção de atualização das previsões de aflúncias semanais na modelagem PREVIVAZH baseia-se na qualidade destas previsões.

Testou-se então todas as opções de atualização, descritas em (II.2.2), para cada uma das séries de aflúncias aos quatro aproveitamentos. A Tabela 4 apresenta os valores dos erros médios relativos da previsão da aflúncia semanal considerando as 5 opções de atualização e sem considerar atualização alguma. Em negrito destacam-se os menores erros médios relativos da previsão.

Pela análise apenas dos erros médios relativos da previsão semanal para os aproveitamentos de Jupirá, Foz do Areia e Sobradinho, a opção escolhida seria a 5. Já para Tucuruí a opção escolhida seria a não atualização dos valores das previsões das aflúncias semanais obtidas pelo modelo semanal (PREVIVAZ), o que pode ser justificado pela boa performance do modelo de previsão semanal que apresenta erros médios inferiores a 10%.

Tabela 4 – Erros Médios Relativos de Previsão Semanal para as opções de atualização

	Jupuí	Foz do Areia	Sobradinho	Tucuruí
Sem Atualização (%)	14,27	33,95	11,26	8,30
Opção 1 (%)	12,87	30,53	9,52	10,39
Opção 2 (%)	11,98	26,76	7,95	9,50
Opção 3 (%)	11,36	23,93	7,59	9,45
Opção 4 (%)	11,11	22,96	7,53	9,43
Opção 5 (%)	10,93	22,36	7,50	9,42

As Figuras 11 a 14 apresentam as médias dos erros relativos de previsão diária em valores absolutos, para os sete dias da semana, considerando todas as opções de atualização das previsões das afluências semanais, inclusive a não atualização. Nota-se nestes gráficos que, de um modo geral, os melhores desempenhos nas previsões diárias são obtidos quando se considera as opções de atualização da previsão semanal que conduziram aos menores erros na previsão semanal. No caso de Jupuí pode-se observar que os erros nas previsões diárias dos primeiros 3 dias são ligeiramente menores quando se adota a opção 3. Conforme descrito em (II.2.3) um critério para escolha da opção de atualização da previsão semanal pode incluir não apenas uma análise do ganho na previsão semanal, mas a análise conjunta da influência da opção de atualização no desempenho da previsão semanal e dos 3 primeiros dias. Para Jupuí adotou-se, então a opção 3.

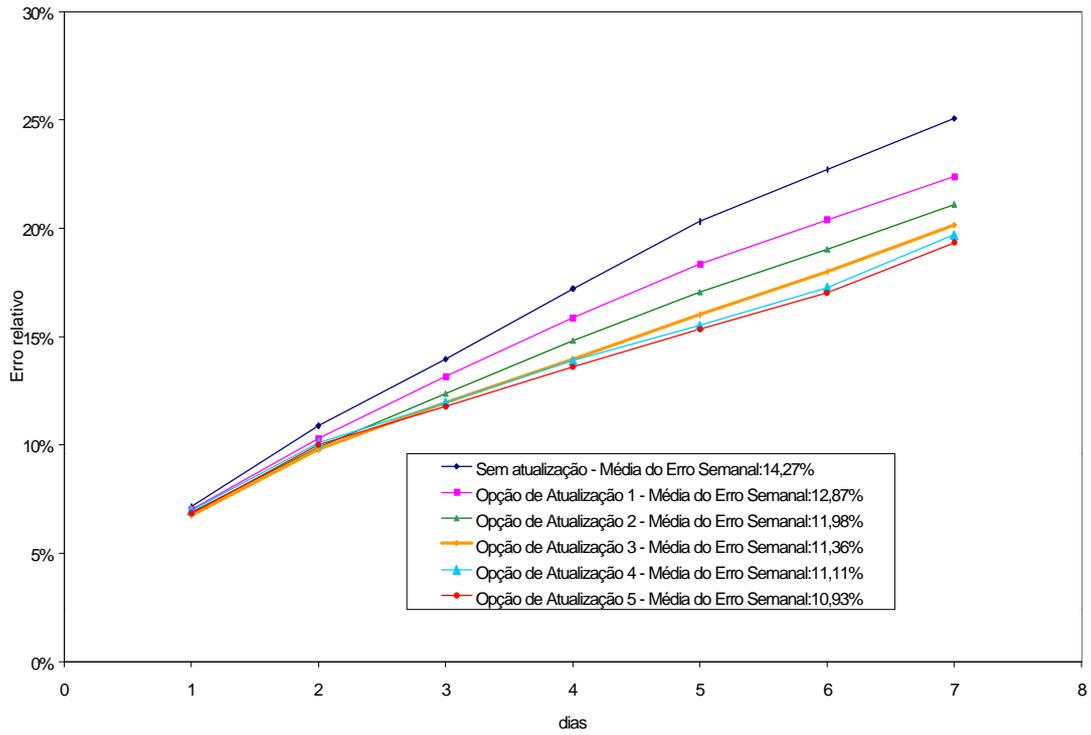


Figura 13 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas as opções de atualização para o Aproveitamento de Jupia.

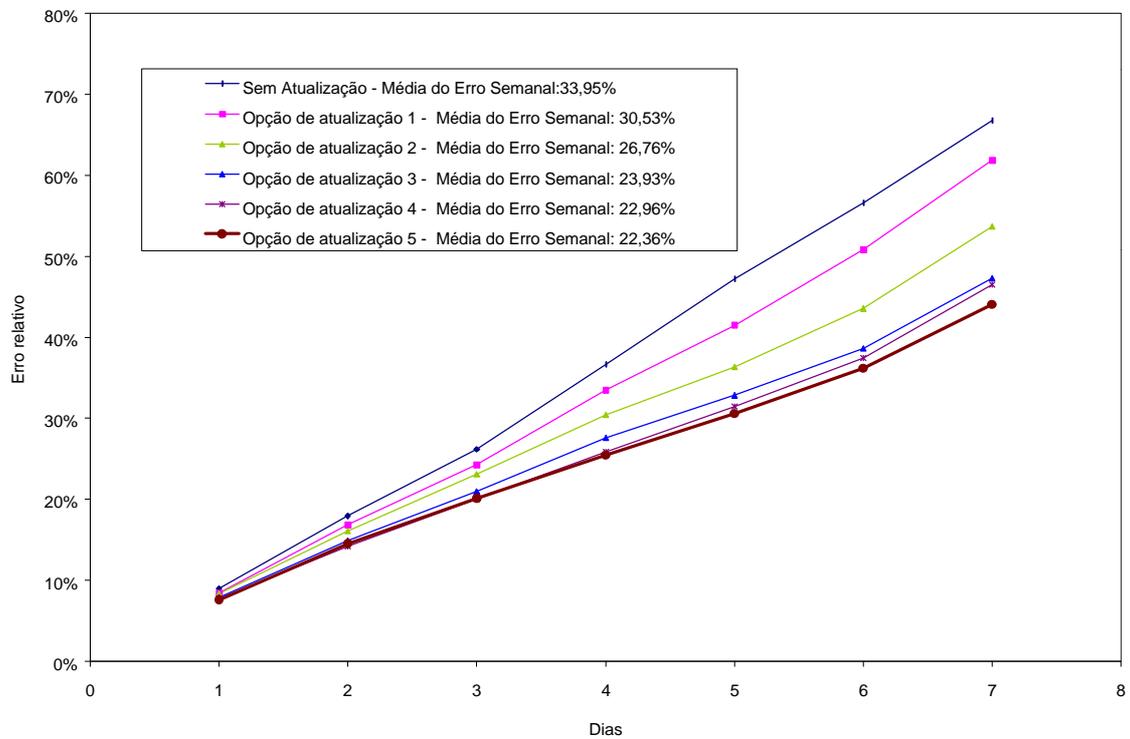


Figura 14 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas as opções de atualização para o Aproveitamento de Foz do Areia.

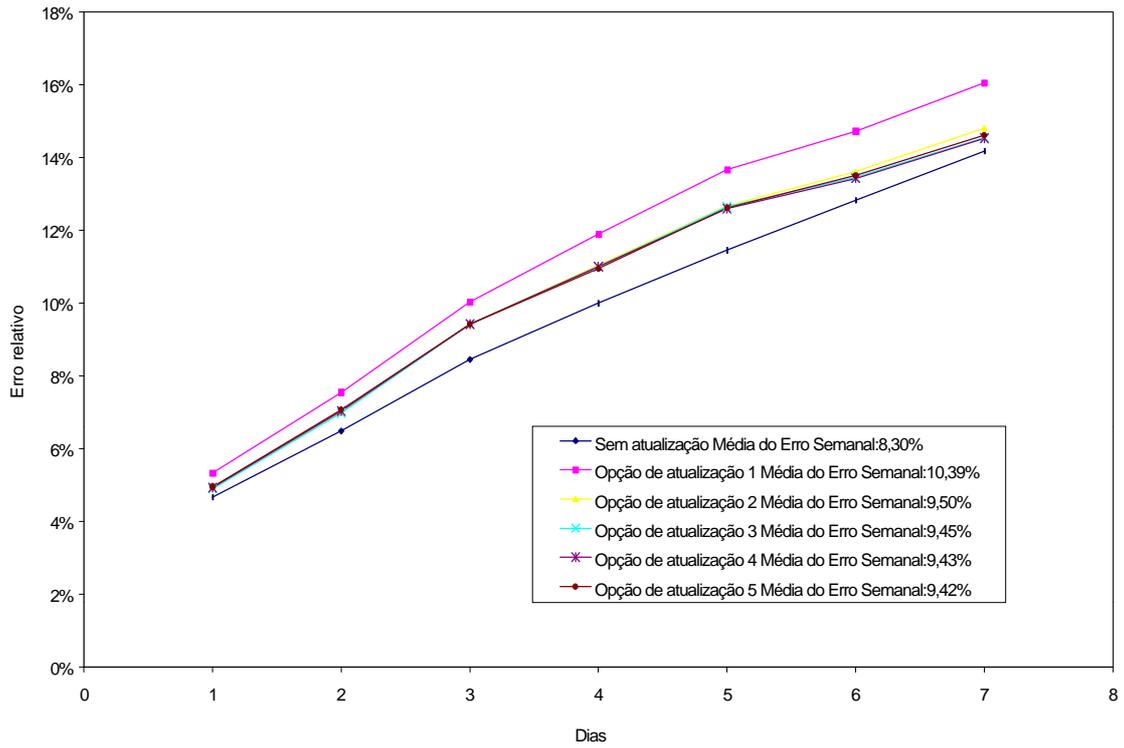


Figura 15 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas as opções de atualização para o Aproveitamento de Tucuruí.

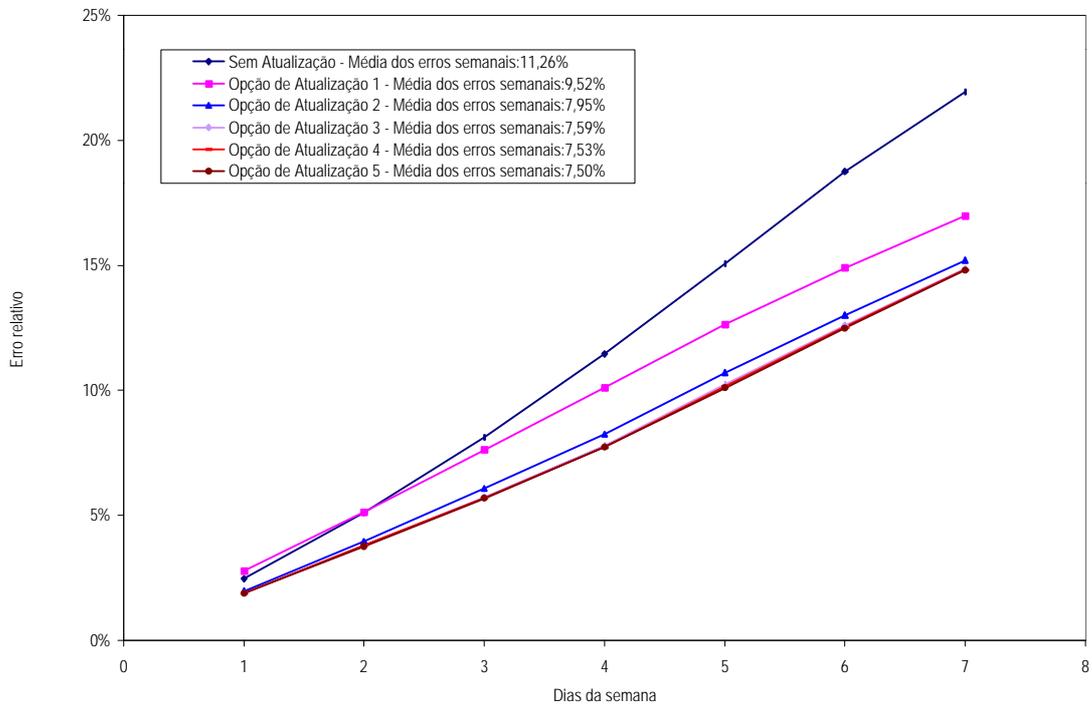


Figura 16 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas as opções de atualização para o Aproveitamento de Sobradinho.

IV.1.2 Correção da Tendenciosidade das Previsões Semanais

Além da análise dos erros médios relativos de previsão semanal, também foi feita uma análise da tendenciosidade da previsão semanal. A tendenciosidade, conforme descrito em (II.2.4), é analisada pela relação entre a previsão da vazão semanal escolhida considerando a melhor opção de atualização e vazão semanal observada. Esta análise pode ser vista na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 – Análise da tendenciosidade da previsão de vazão semanal. (*) Considerando a opção 3.

	Jupia^(*)	Foz do Areia	Sobradinho	Tucuruí
Tendenciosidade (%)	-0,8	-3,6	+0,4	-1,4
Significância Estatística (m ³ /s)	-58,7 ± 93,6	-31,0 ± 21,2	+7,2 ± 19,4	-155 ± 106

A tendenciosidade é apresentada em %, e pode ser interpretada como “o quanto acima ou abaixo da vazão observada o modelo está prevendo”. É calculada pela média das razões das vazões semanais escolhidas pelas vazões previstas inicialmente pelo Modelo PREVIVAZ.

A significância estatística é apresentada com o intervalo de confiança de dois desvios-padrão (95% de intervalo de confiança).

Analisando a tabela anterior verifica-se que para os aproveitamentos de Foz do Areia e Tucuruí a tendenciosidade mostrou-se estatisticamente significativa o que levou à necessidade de uma correção, conforme descrito em (II.2.4).

As Figuras 15 a 18 apresentam gráficos das tendenciosidades das previsões de aflúncias diárias para os 7 dias da semana, obtidas com a melhor opção de atualização e sem correção da tendenciosidade. Os valores deste gráfico foram obtidos calculando-se as médias das diferenças entre os valores previstos e observados (em m³/s), estas médias foram então divididas pelo aflúncia média do histórico de forma a apresentar os resultados em percentuais. Estes gráficos apresentam ainda o intervalo de confiança de 95% em torno de zero. O ideal é que este gráfico apresente os valores dentro do intervalo (previsão não-tendenciosa), o que é alcançado em Jupia (Figura 15) e em Sobradinho (Figura 16) coincidindo com a não tendenciosidade da previsão semanal destes aproveitamentos. Já na Figura 17 e 18, pode-se observar que tanto para o aproveitamento de Foz do Areia, quanto para o

aproveitamento de Tucuruí, vários pontos estão fora dos limites, consequência da tendenciosidade da previsão semanal estatisticamente significativa para este aproveitamento, conforme verificado acima. As Figuras 19 e 20 apresentam os gráficos de tendenciosidade da previsão diária destes dois aproveitamentos após a correção de tendência da previsão semanal, pode-se observar uma grande melhoria nos dois casos.

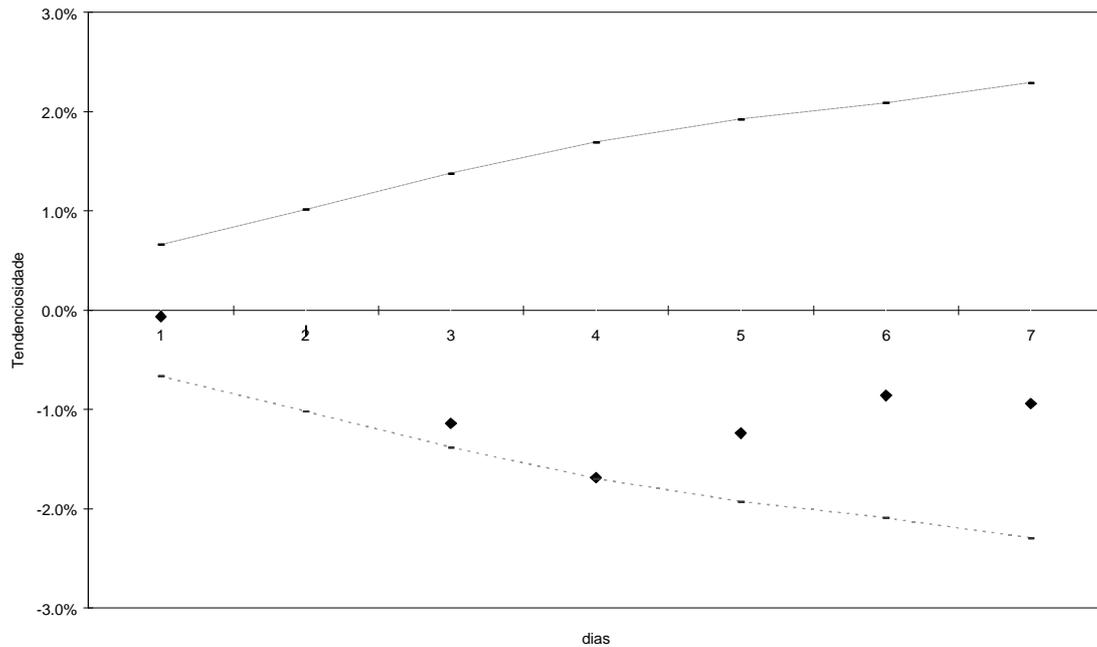


Figura 17 – Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Jupia. Período analisado: 1985 a 1999.

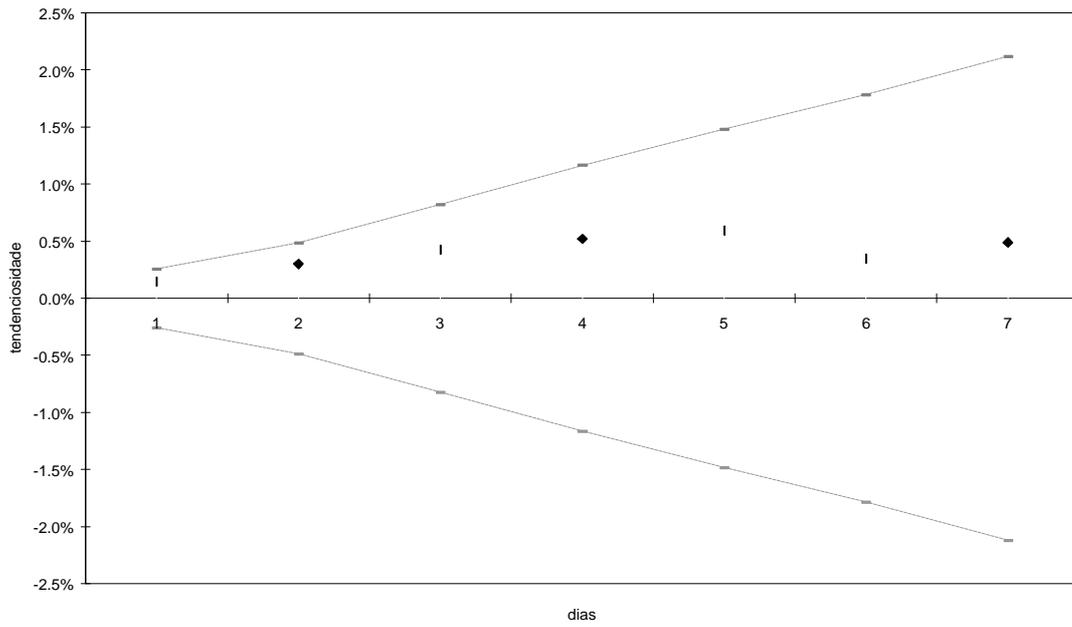


Figura 18 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Sobradinho. Período analisado: 1985 a 1999.

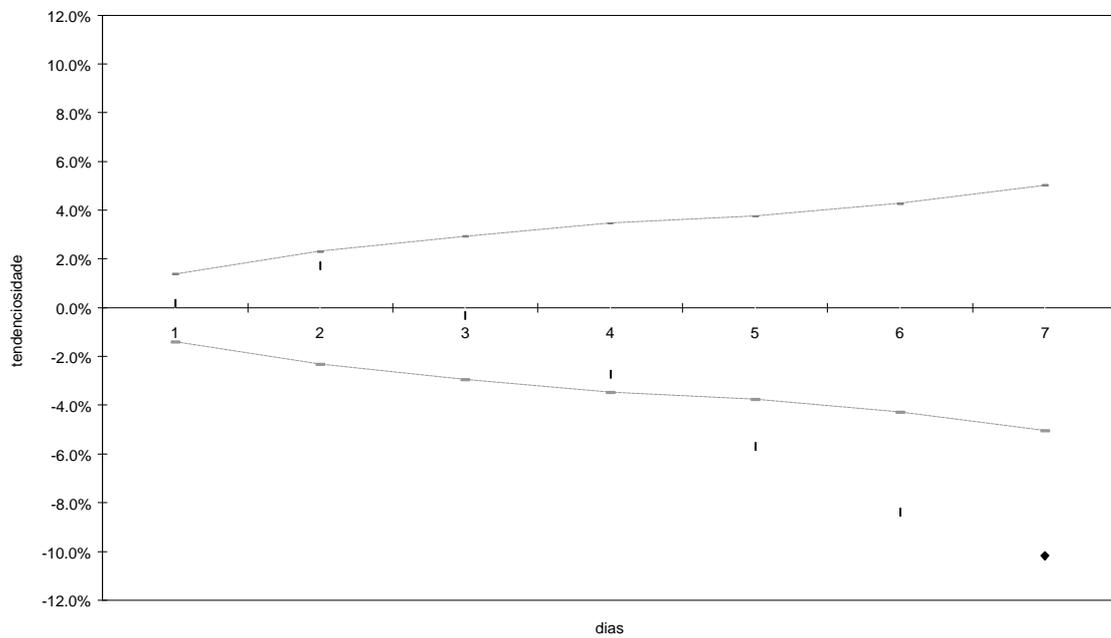


Figura 19 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Foz do Areia, sem correção da tendenciosidade da previsão de vazões semanais. Período analisado: 1989 a 1998.

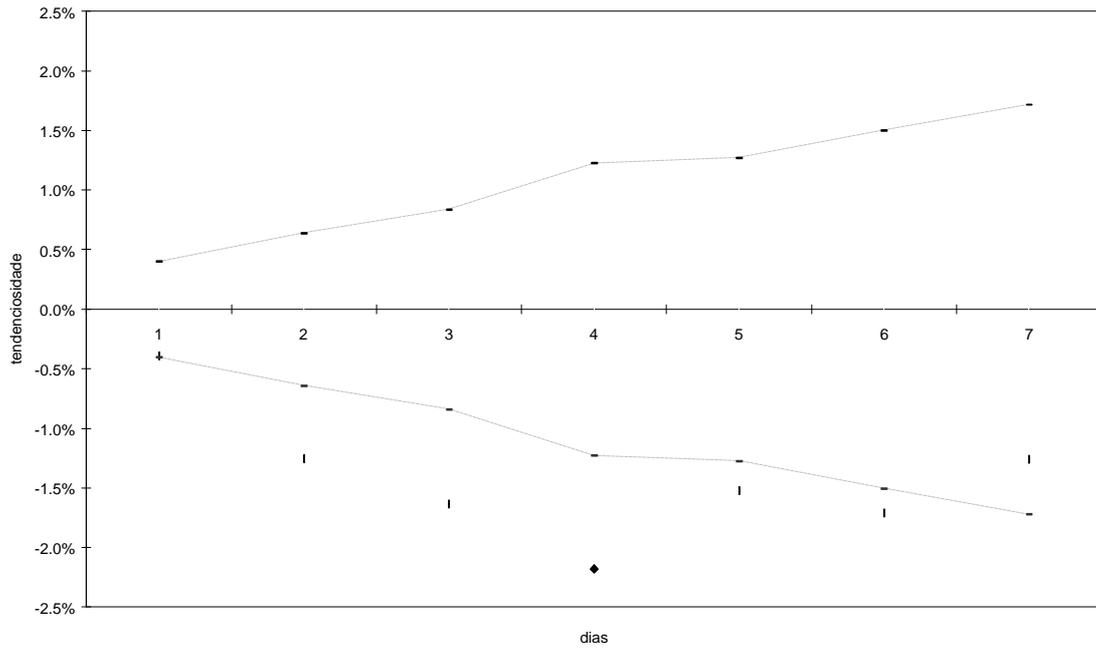


Figura 20 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Tucuruí. Sem correção da tendenciosidade da previsão semanal. Período analisado: 1985 a 1999.

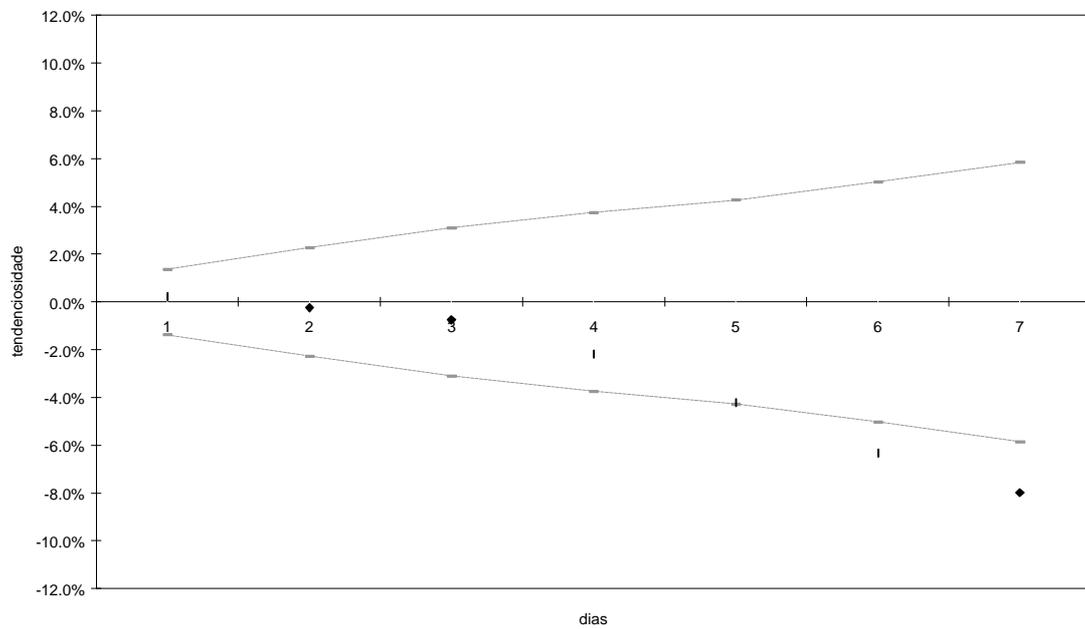


Figura 21 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Foz do Areia, com correção da tendenciosidade da previsão de vazões semanais. Período analisado: 1989 a 1998.

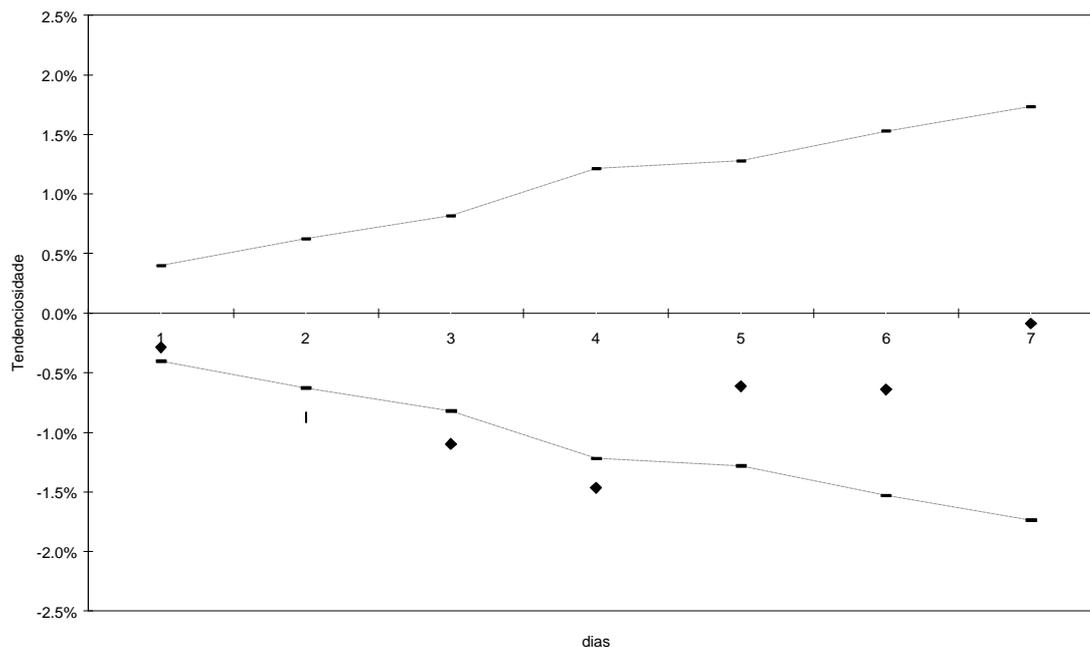


Figura 22 - Análise da tendenciosidade das previsões de vazões diárias para o aproveitamento de Tucuruí. Após correção da tendenciosidade da previsão semanal. Período analisado: 1985 a 1999.

V.2 Análise das Previsões Diárias

Como resultado da Calibração obteve-se as seguintes opções:

- ✓ Foz do Areia: opção 5 de atualização da previsão semanal e correção da tendenciosidade.
- ✓ Sobradinho: opção 5 de atualização da previsão semanal e sem correção da tendenciosidade.
- ✓ Jupiá: opção 3 de atualização da previsão semanal e sem correção da tendenciosidade.
- ✓ Tucuruí: não atualização da previsão semanal e correção da tendenciosidade.

A análise mais detalhada das previsões diárias obtidas por estes ajustes é apresentada a seguir.

Figuras 21 a 24 apresentam, para os quatro aproveitamentos, o mesmo tipo de gráfico apresentado nas Figuras 11 a 14, só que apenas para a melhor opção de atualização da previsão da afluência semanal. Pode-se observar que em todos os casos os erros

são crescentes com o horizonte da previsão. Da análise de cada caso separadamente podemos ressaltar que para Sobradinho (Figura 24), os erros são da ordem de 2% para o primeiro dia e 15% para o sétimo dia. Em Jupia (Figura 21), pode-se observar erros um pouco maiores, da ordem de 7% para o primeiro dia e de 20% para o sétimo dia. Em Tucuruí (Figura 23), os erros são da ordem de 5% para o primeiro dia e 15% para o sétimo dia. E, finalmente para Foz do Areia (Figura 22), devido ao comportamento mais errático das vazões, os erros são um pouco maiores, da ordem 8% para o primeiro dia e 46% para o sétimo dia.

Conclui-se pela análise destes quatro gráfico, que existe uma persistência no comportamento dos erros que aumentam proporcionalmente com o horizonte de previsão, o que pode ser facilmente explicado pela própria característica da modelagem que tem uma forte ligação com as duas últimas vazões observadas, gerando erros baixos para os primeiros dias e tendendo a jogar os erros mais altos para o final da semana, erros mais altos que são gerados pelo erro advindo da previsão semanal.

As Figuras 25 a 68 apresentam os erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para cada dia da semana. Nestes gráficos podemos analisar o comportamento sazonal dos erros de previsão. Cabe ressaltar que este comportamento sazonal dos erros vai ao encontro da análise da sazonalidade obtida através do comportamento das vazões semanais (figuras 7 a 10).

Também se pode observar com este tipo de análise gráfica, que o comportamento sazonal dos erros é mais bem observado quanto maior o horizonte, isto é, para os primeiros dias os erros são menores, independentemente da época do ano, isto pode ser facilmente explicado também pela forte dependência das últimas afluições observadas sobre as previsões para os primeiros dias da semana.

Finalmente, as Figuras 53 a 68 apresentam os gráficos de previsão para 7 dias em quatro diferentes períodos do ano (seca, cheia e transições) para os quatro aproveitamentos estudados. Nestes gráficos apresentamos alguns exemplos de previsão dentro do conjunto de anos utilizados para ajuste da modelagem. Pode-se observar o bom comportamento da modelagem em representar recessões e ascensões das hidrógrafas.

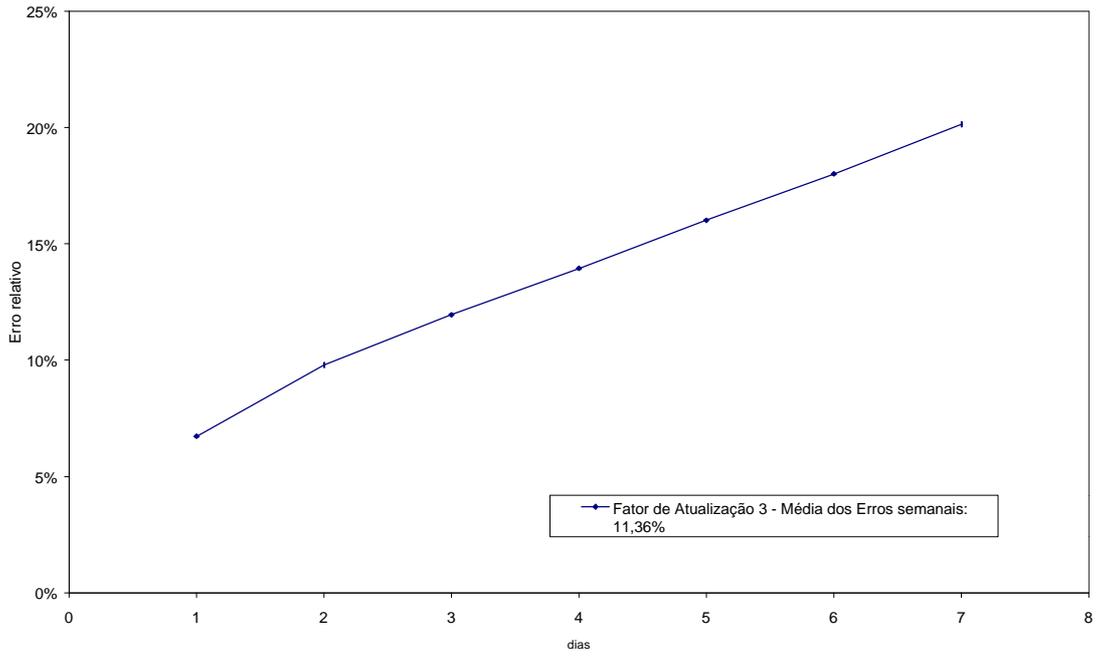


Figura 23 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para a melhor opção de atualização para o Aproveitamento de Jupiá.

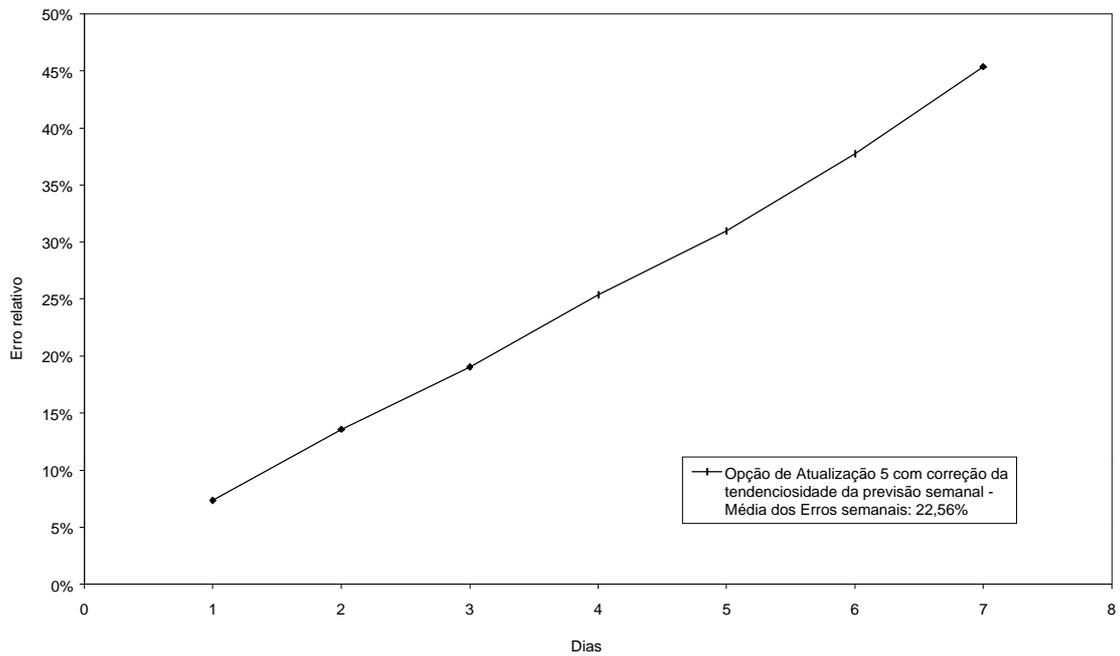


Figura 24 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para a melhor opção de atualização para o Aproveitamento de Foz do Areia.

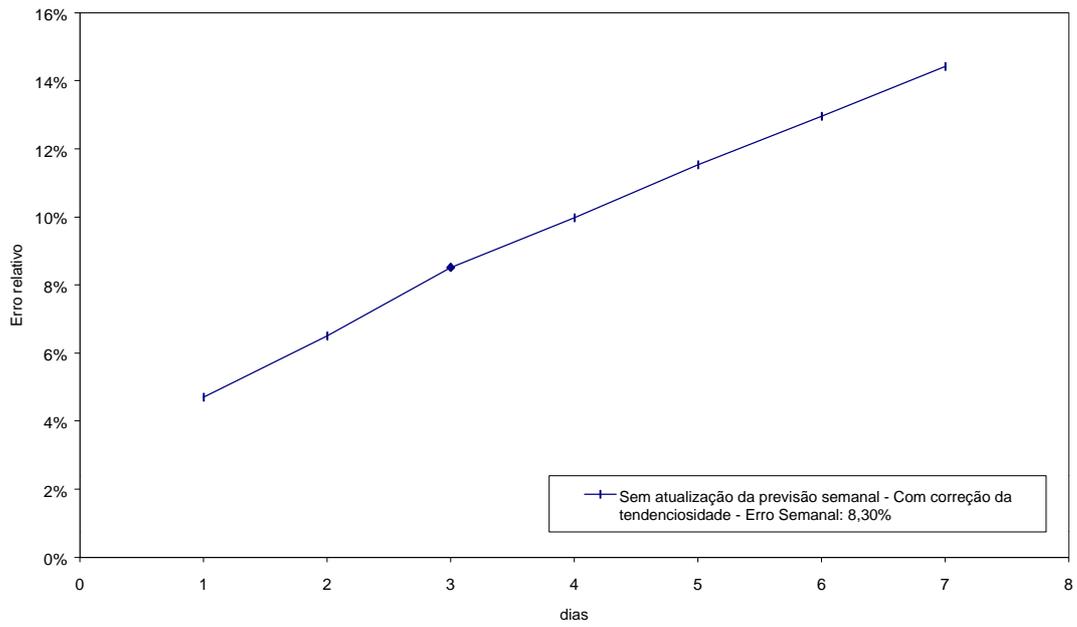


Figura 25 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para todas a melhor opção de atualização para o Aproveitamento de Tucuruí.

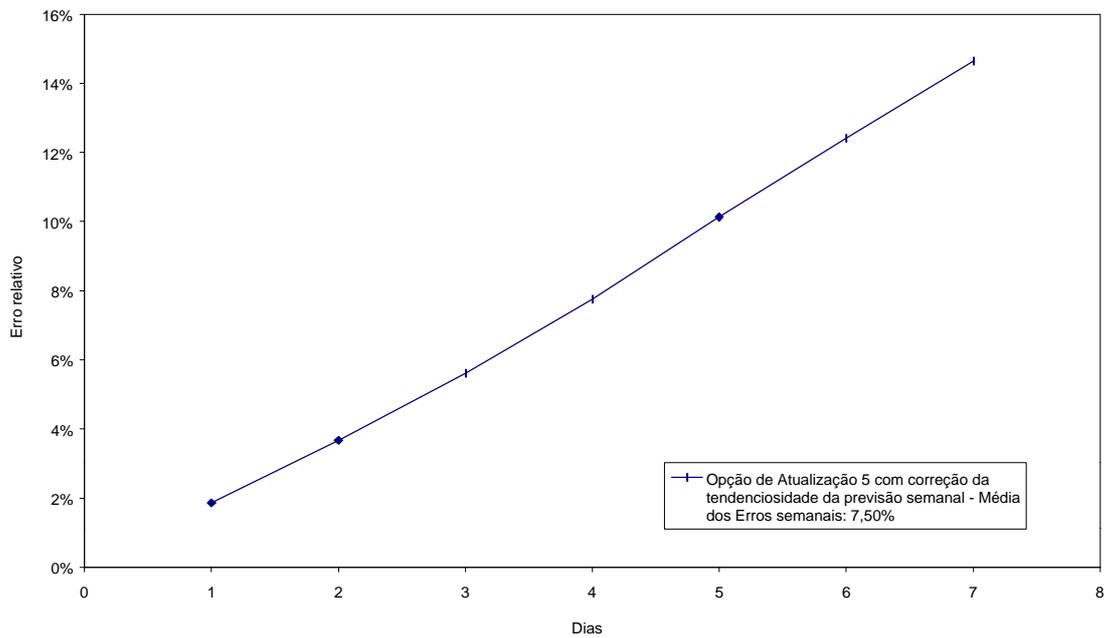


Figura 26 - Média dos Erros Absolutos de Previsão para 7 dias para a melhor opção de atualização para o Aproveitamento de Sobradinho.

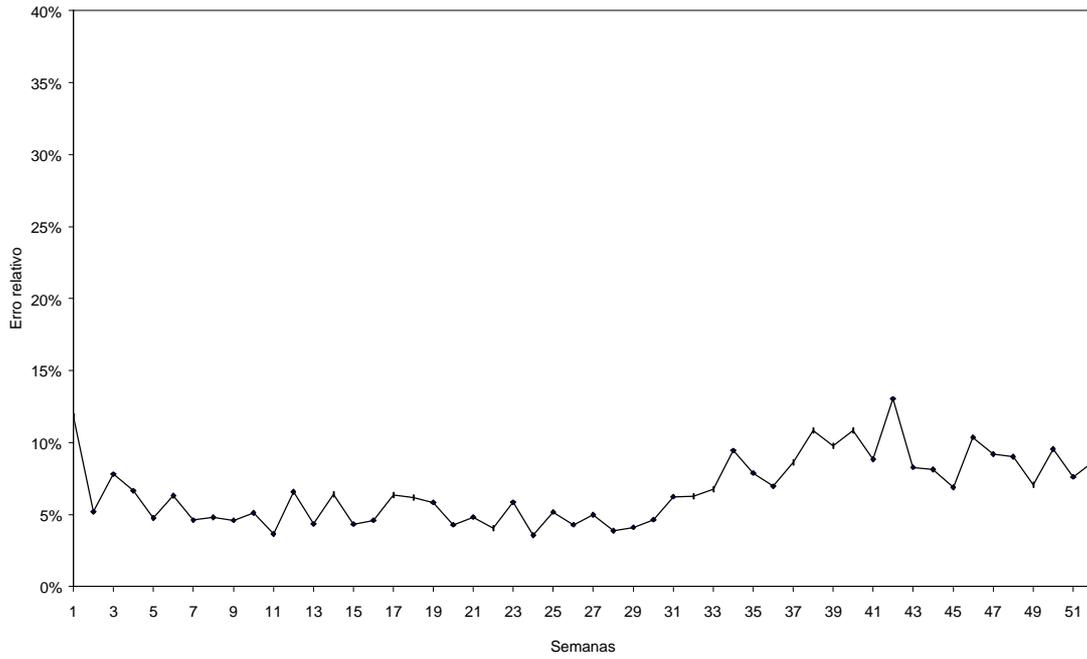


Figura 27 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o primeiro dia da semana. Aproveitamento: Jupuíá. Período Analisado: 1985 a 1999.

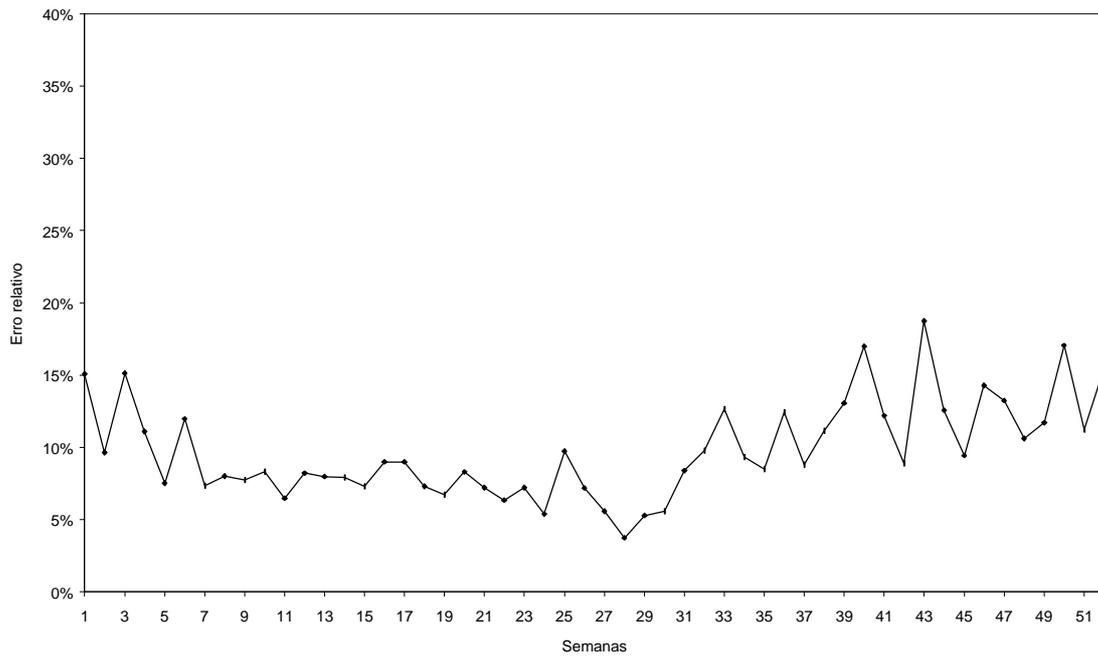


Figura 28 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o segundo dia da semana. Aproveitamento: Jupuíá. Período Analisado: 1985 a 1999.

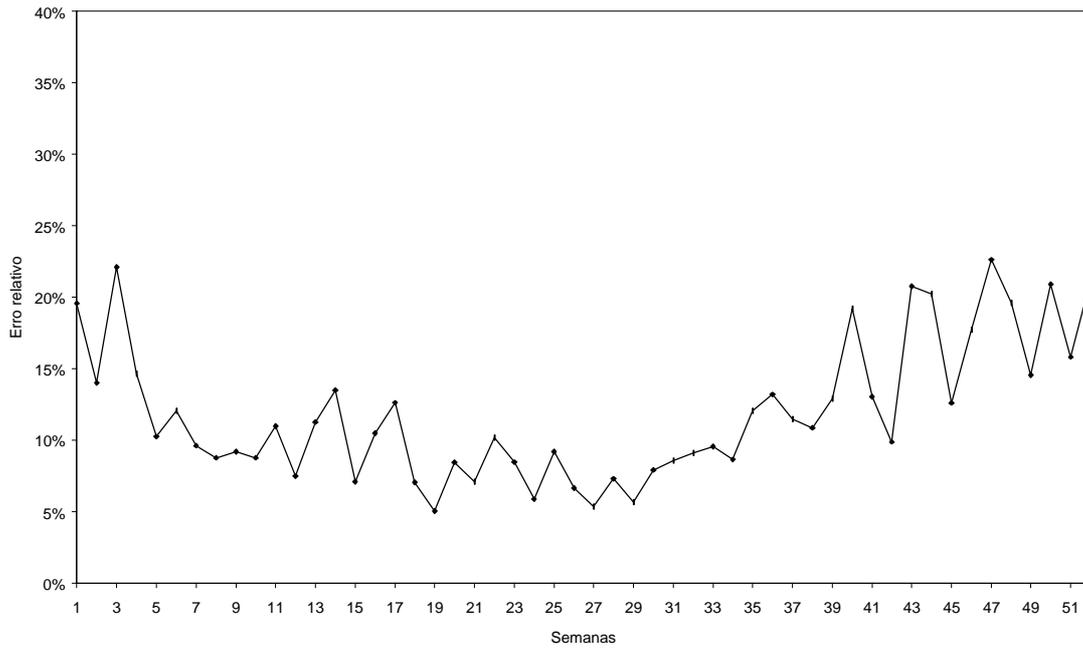


Figura 29 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o terceiro dia da semana. Aproveitamento: Jupia. Período Analisado: 1985 a 1999.

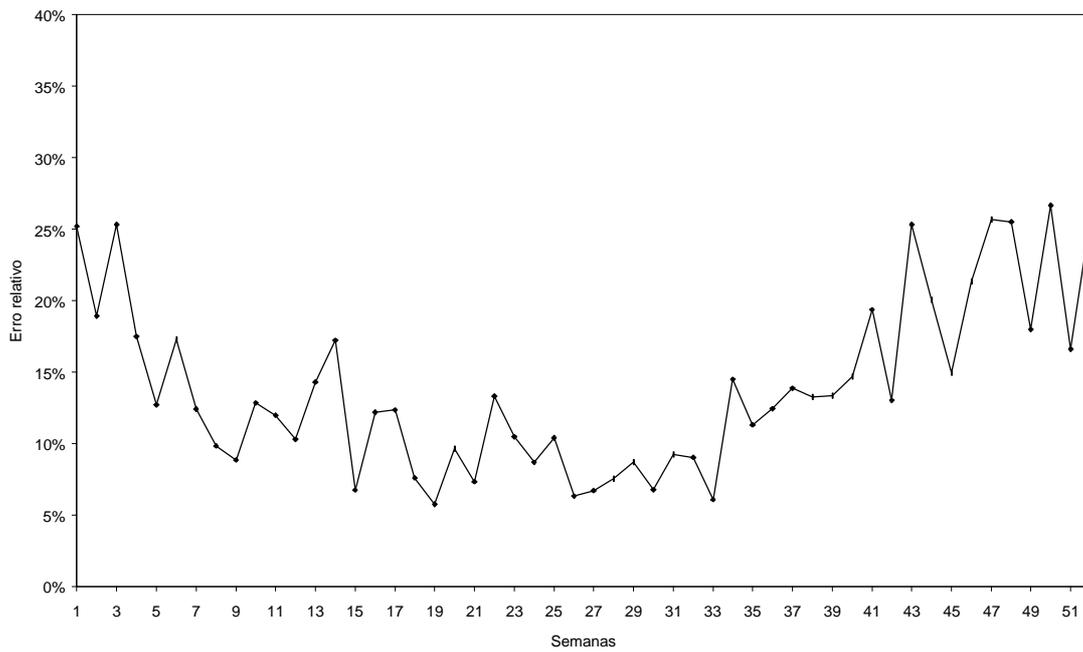


Figura 30 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quarto dia da semana. Aproveitamento: Jupia. Período Analisado: 1985 a 1999.

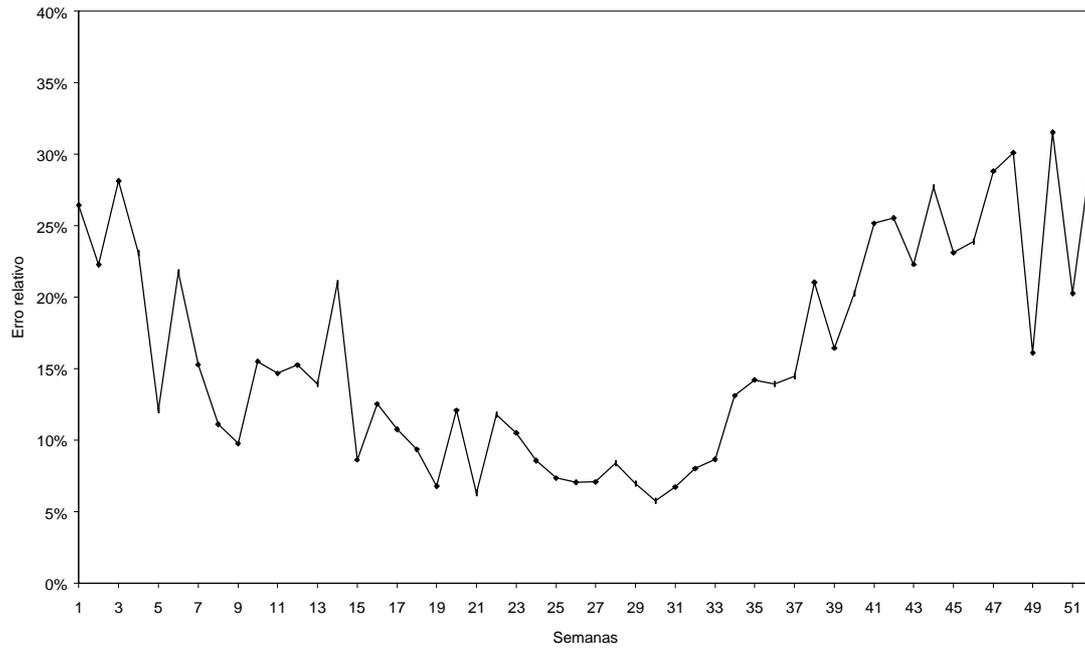


Figura 31 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quinto dia da semana. Aproveitamento: Jupia. Período Analisado: 1985 a 1999.

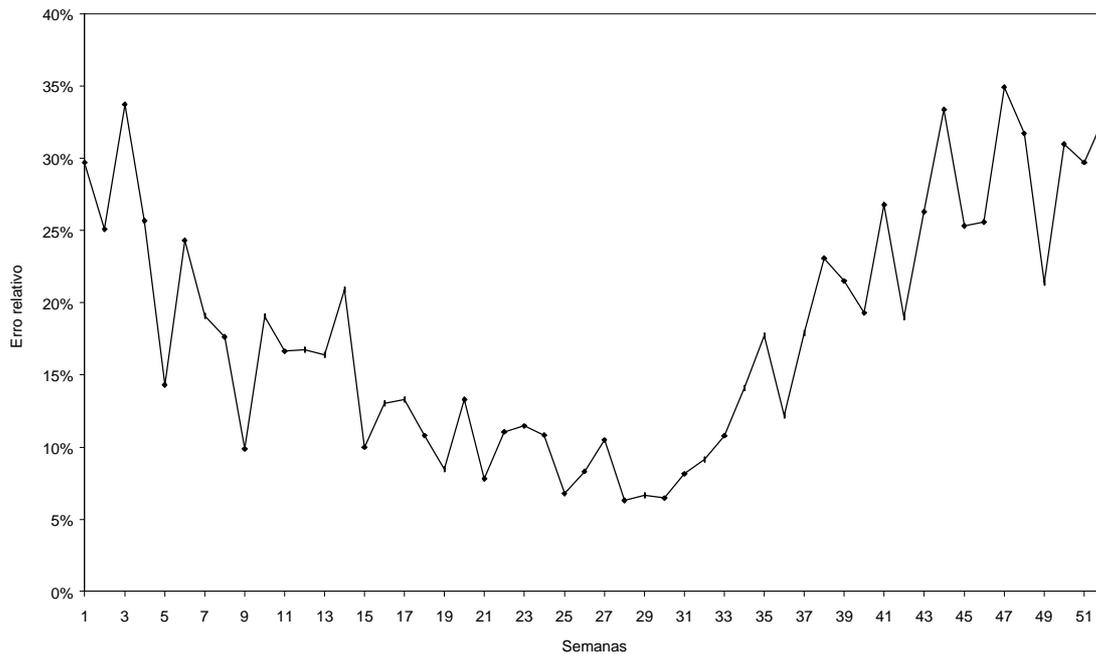


Figura 32 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sexto dia da semana. Aproveitamento: Jupia. Período Analisado: 1985 a 1999.

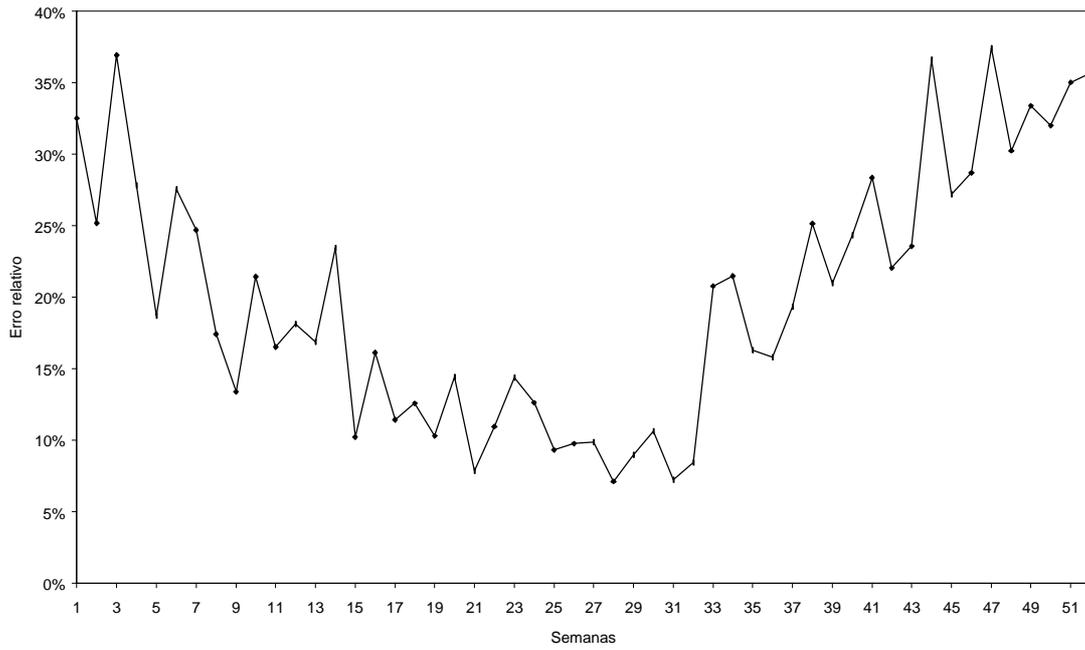


Figura 33 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sétimo dia da semana. Aproveitamento: Jupia. Período Analisado: 1985 a 1999.

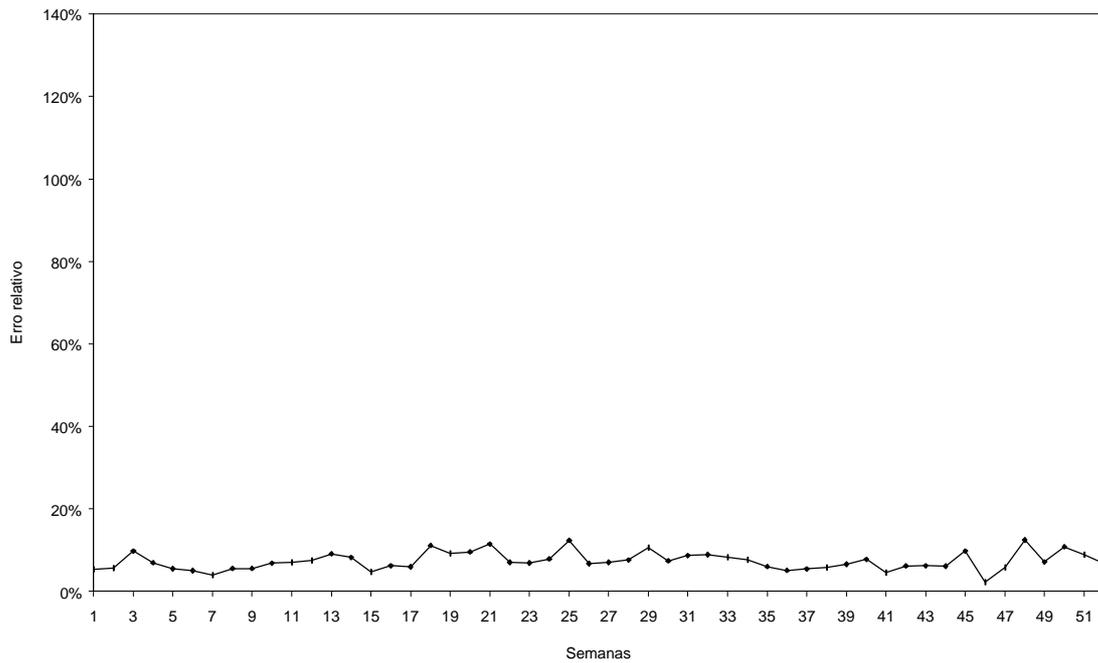


Figura 34 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o primeiro dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.

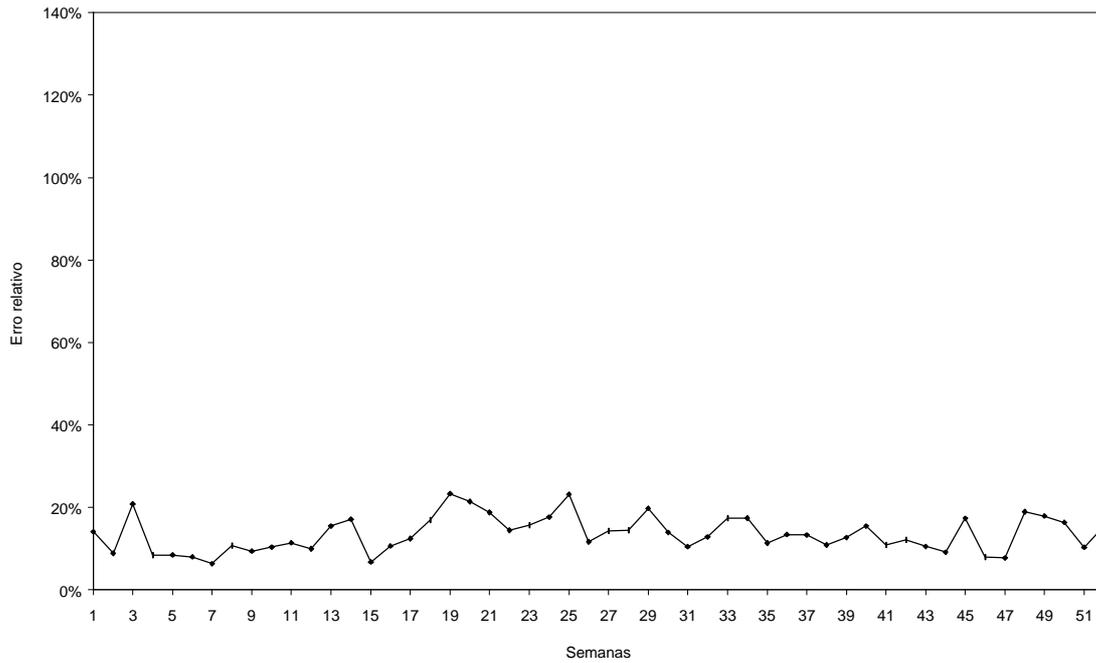


Figura 35 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o segundo dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.

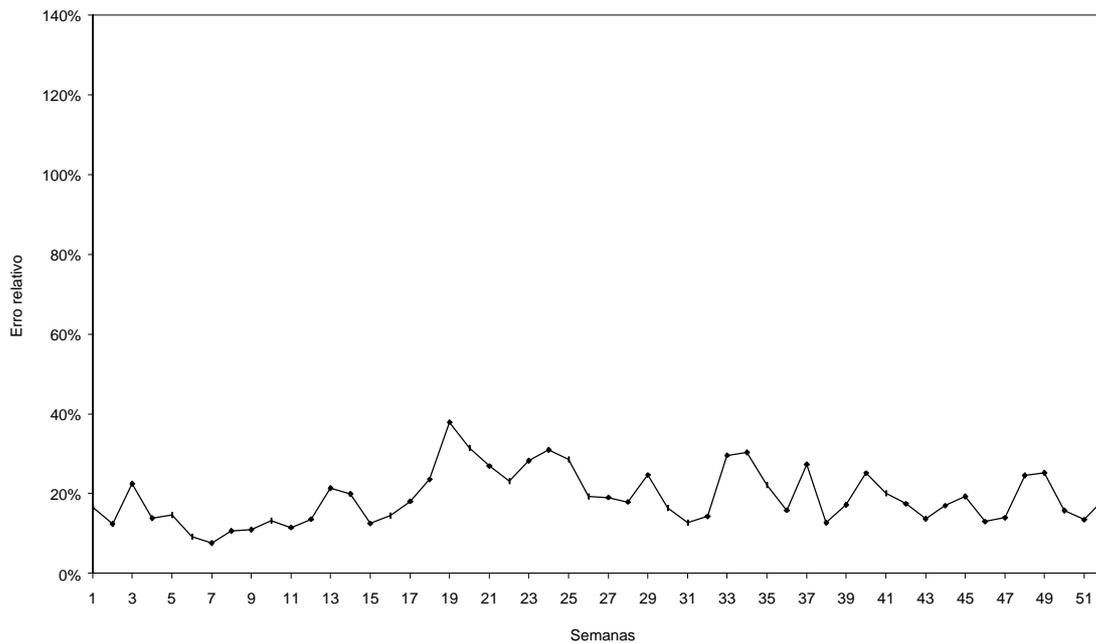


Figura 36 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o terceiro dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.

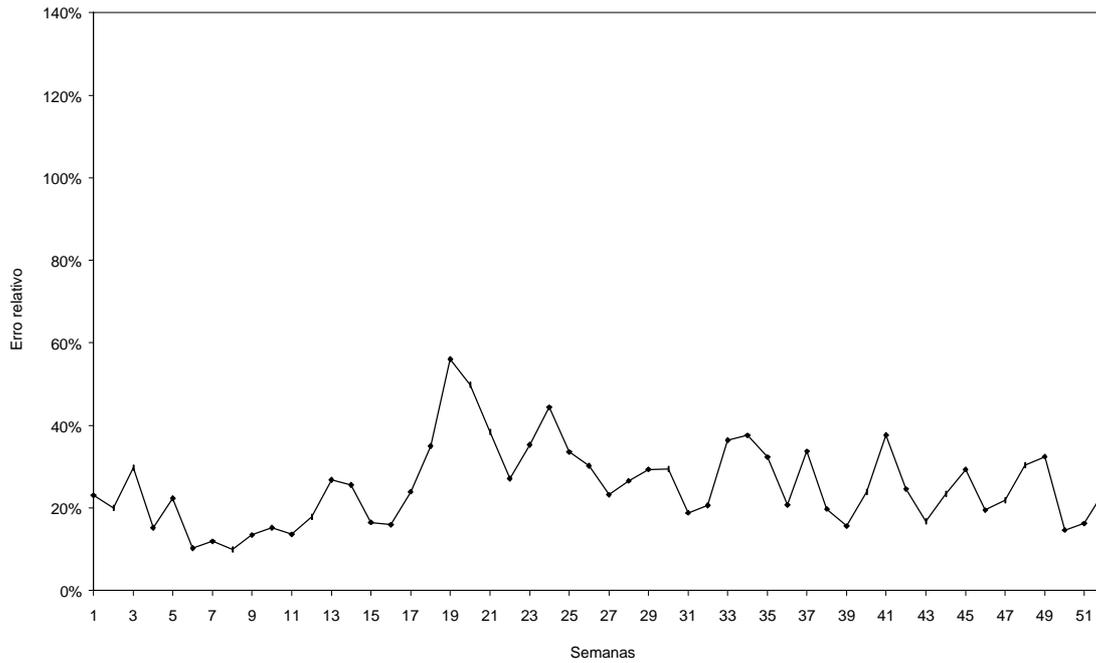


Figura 37 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quarto dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.

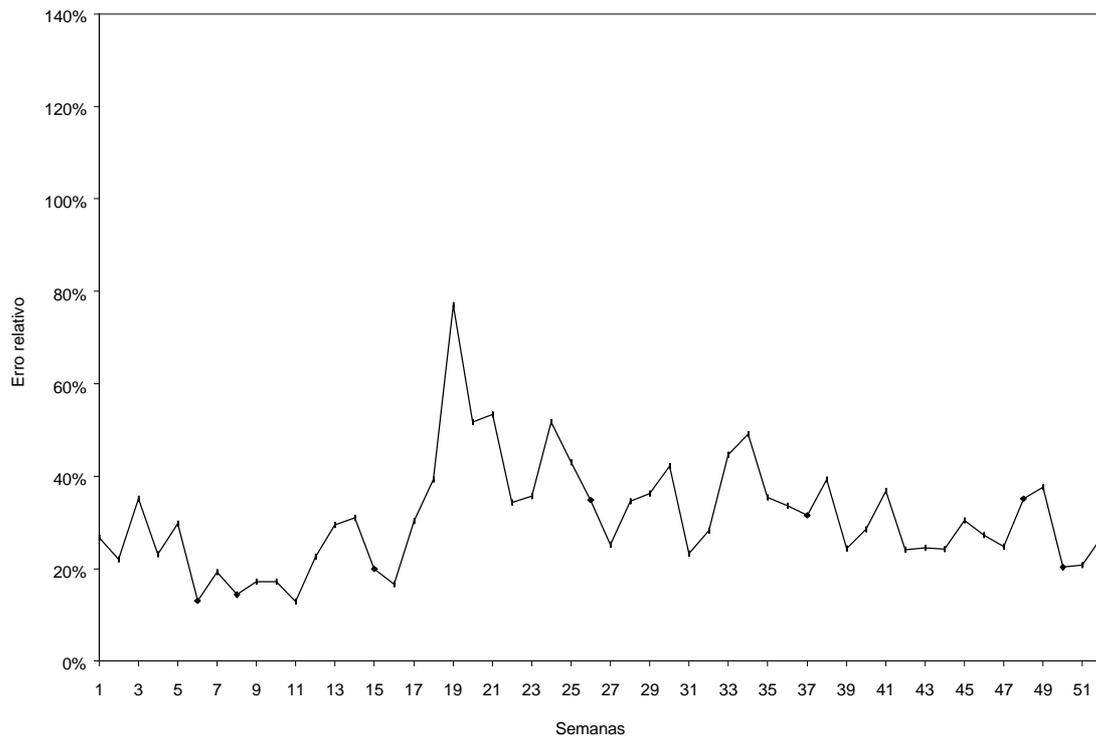


Figura 38 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quinto dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.

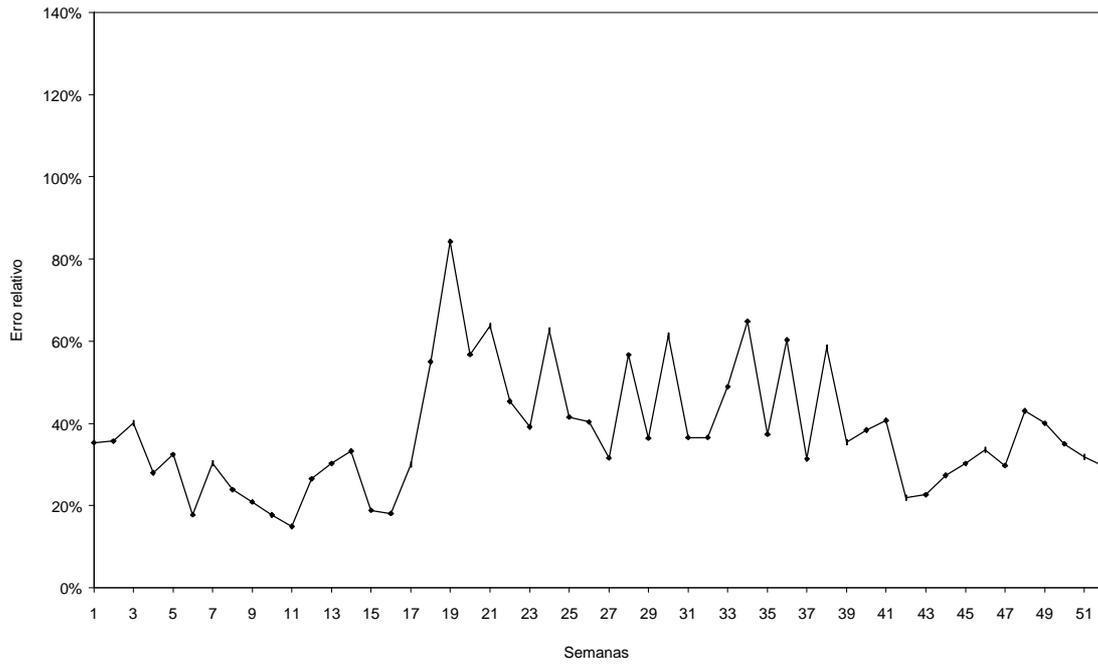


Figura 39 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sexto dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.

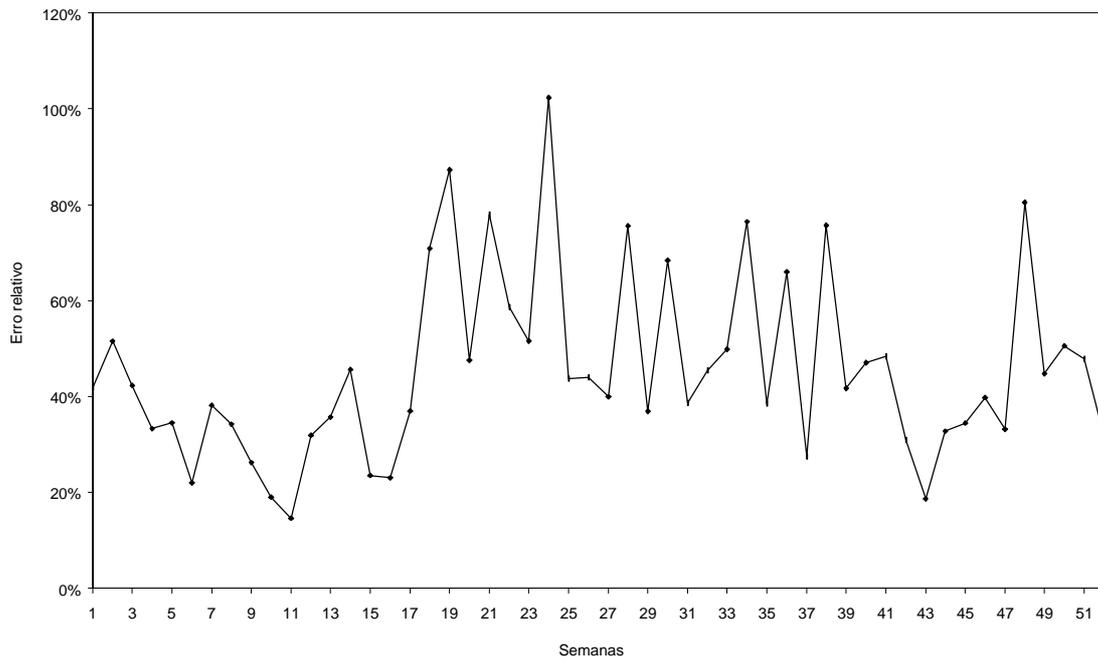


Figura 40 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sétimo dia da semana. Aproveitamento: Foz do Areia. Período Analisado: 1989 a 1998.

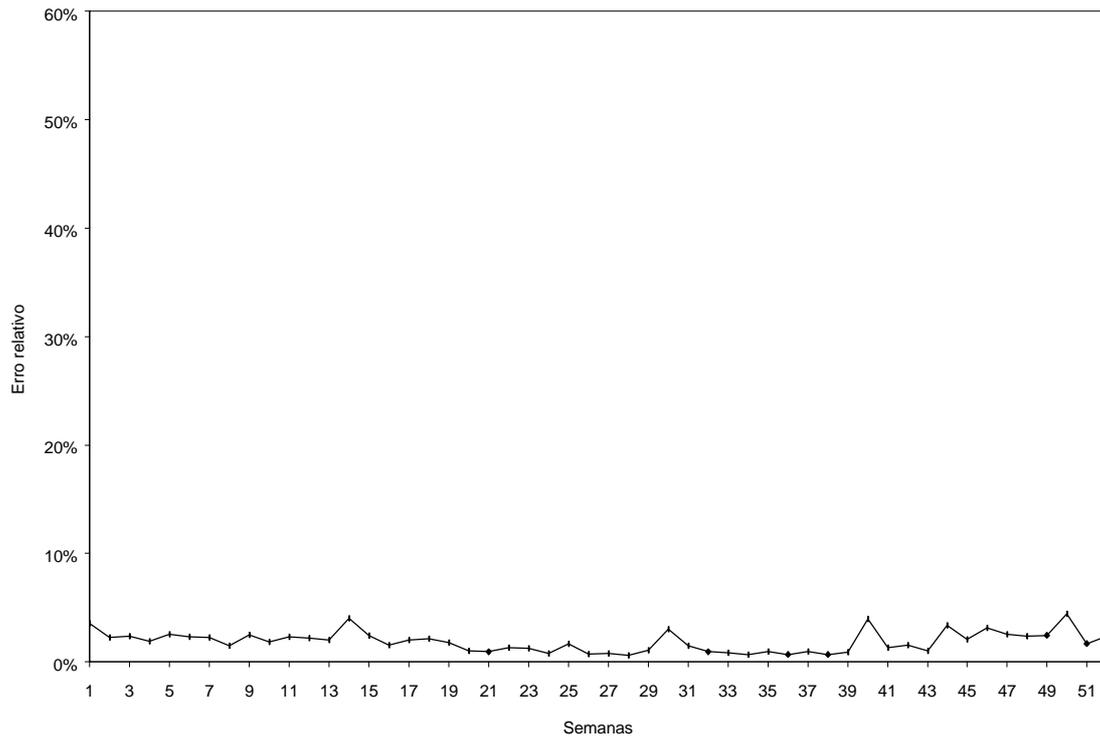


Figura 41 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o primeiro dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.

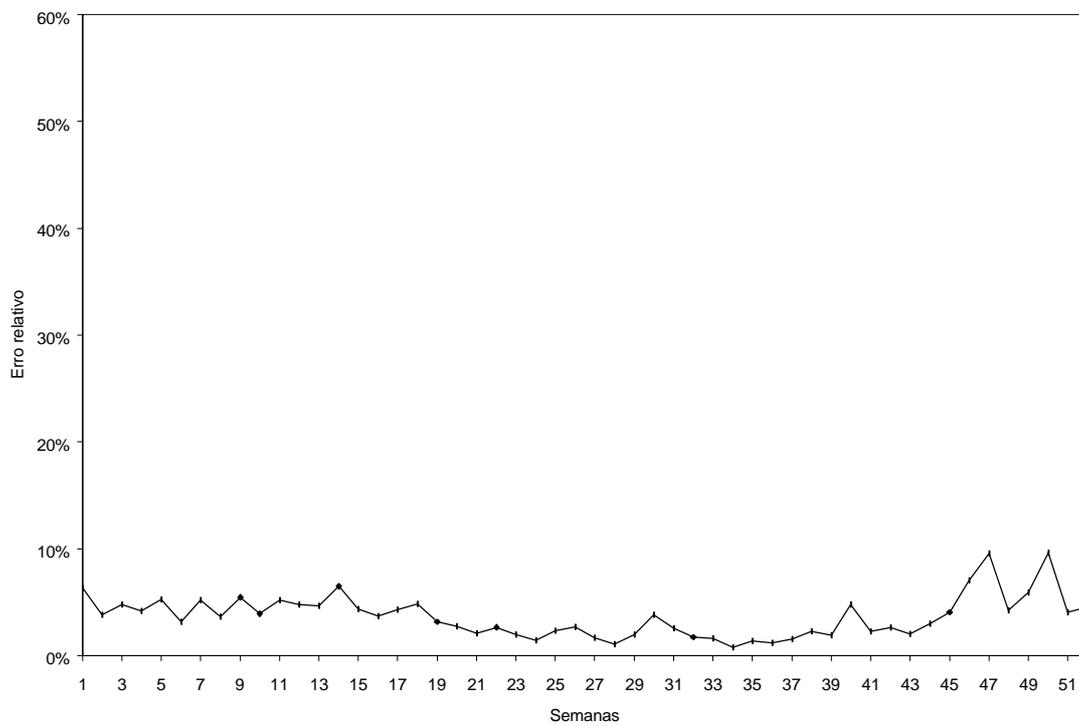


Figura 42 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o segundo dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.

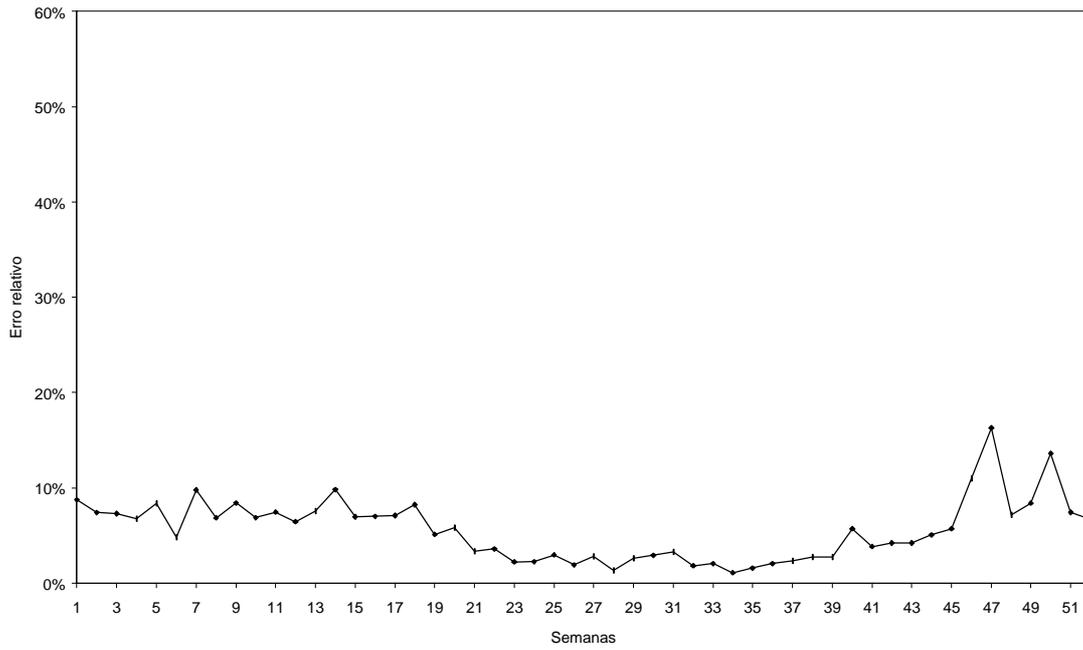


Figura 43 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o terceiro dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.

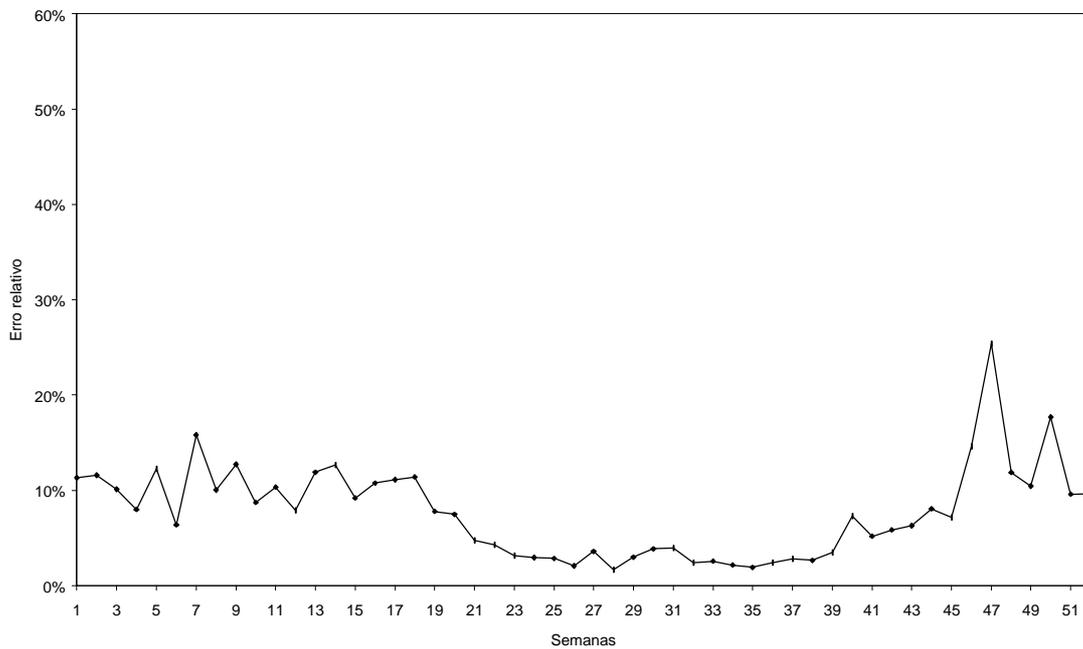


Figura 44 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quarto dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.

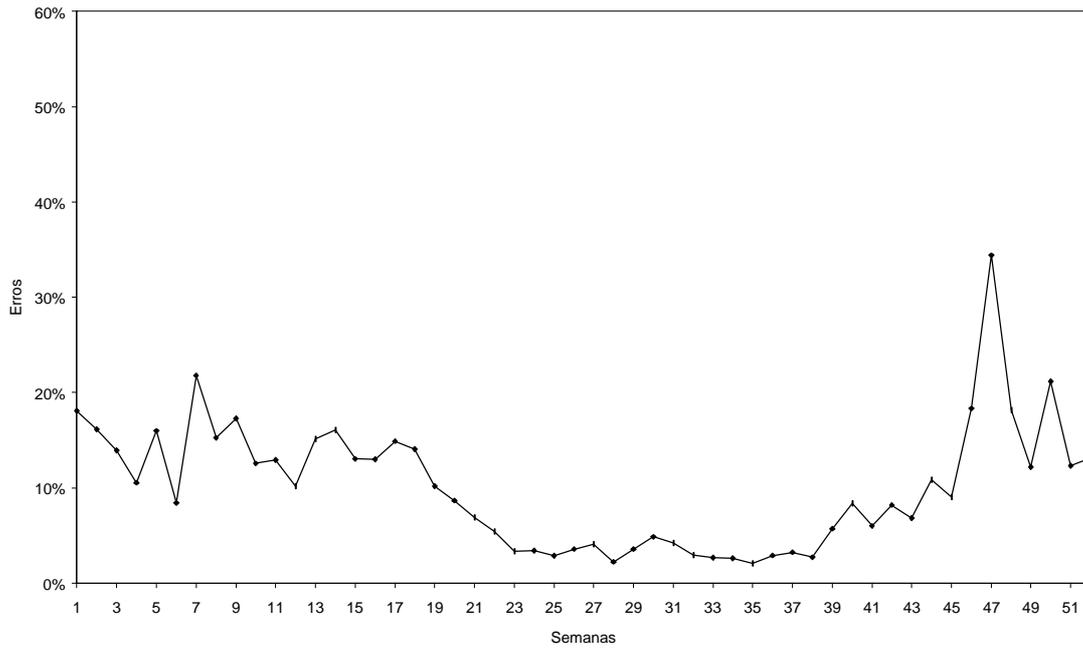


Figura 45 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quinto dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.

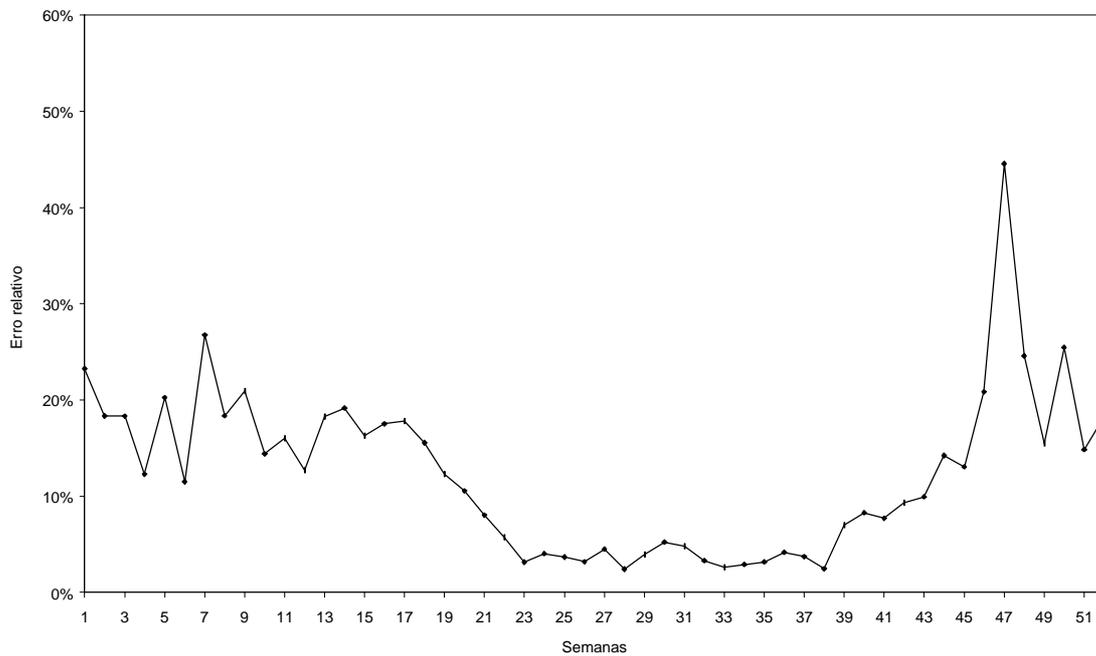


Figura 46 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sexto dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.

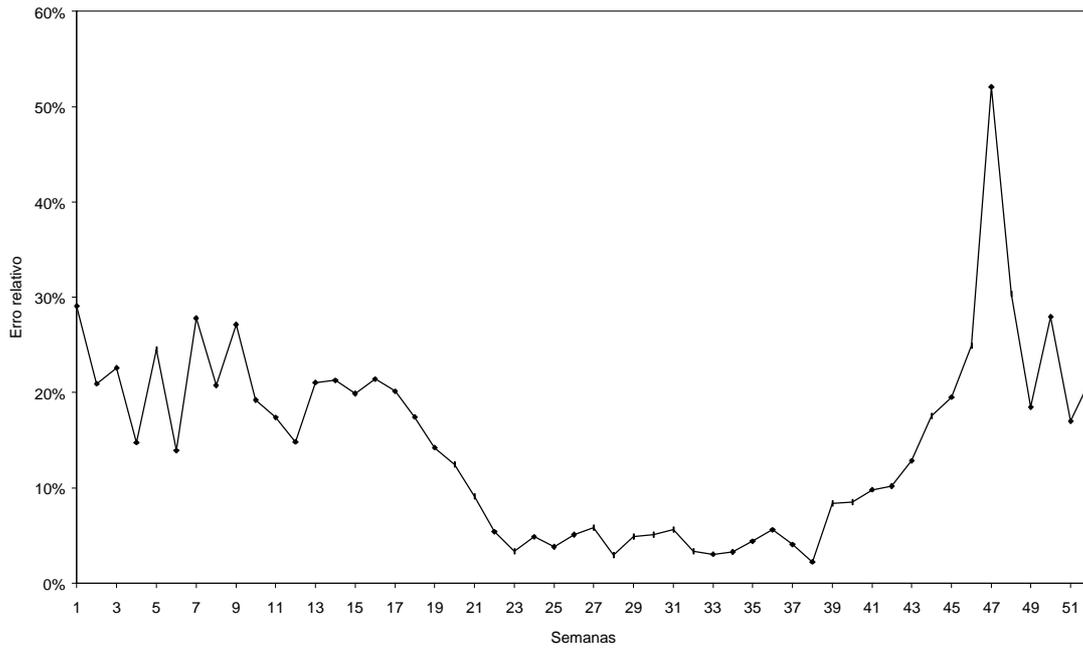


Figura 47 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sétimo dia da semana. Aproveitamento: Sobradinho. Período Analisado: 1985 a 1999.

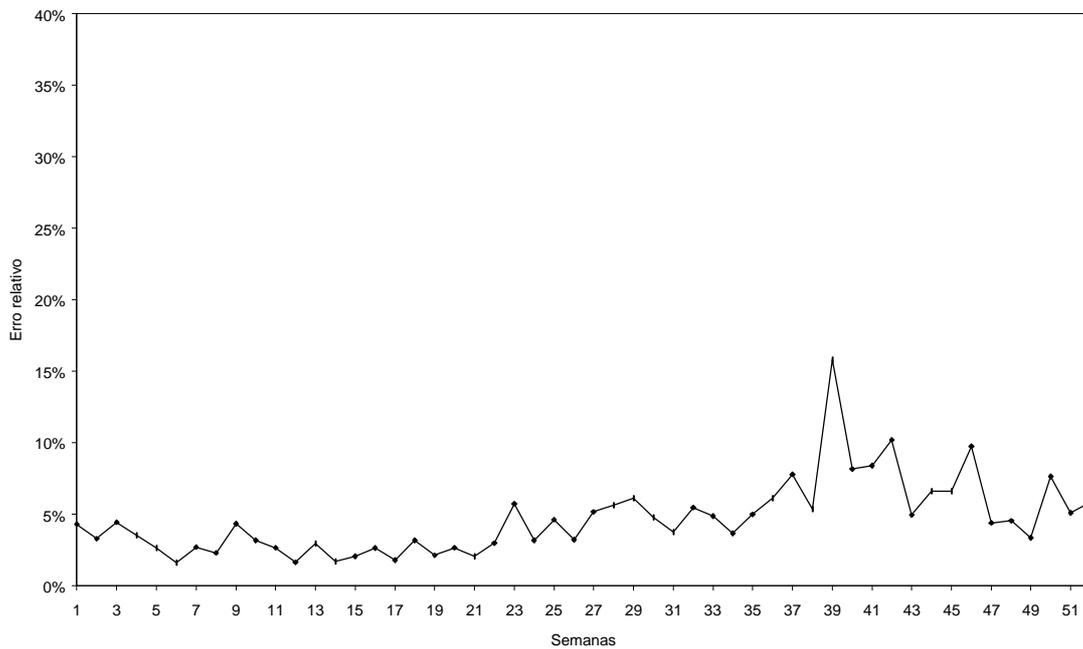


Figura 48 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o primeiro dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.

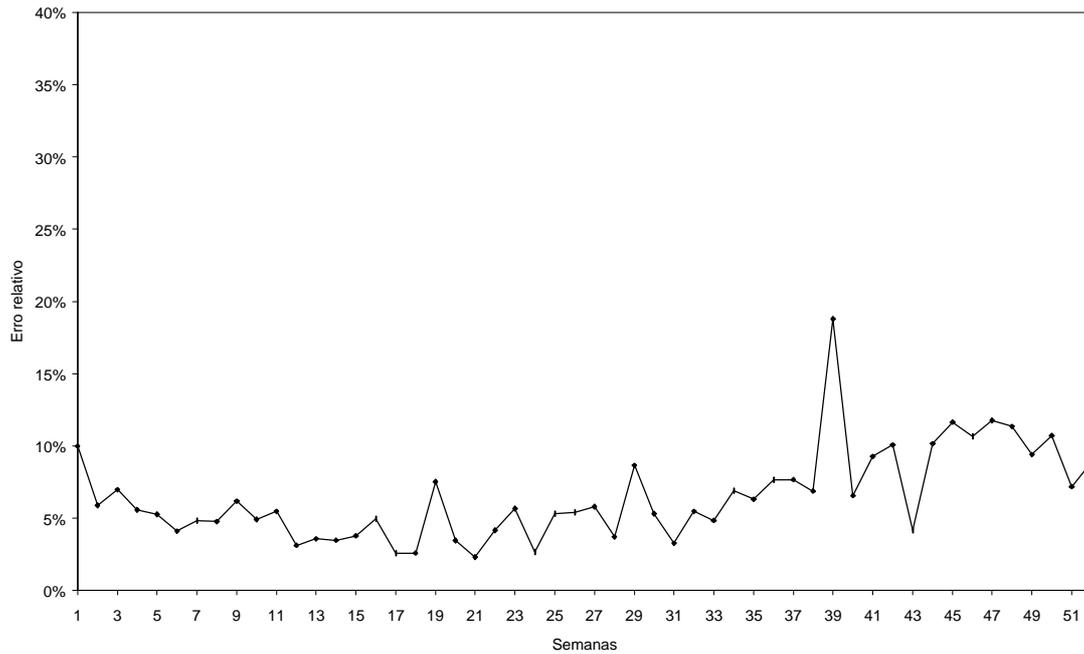


Figura 49 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o segundo dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.

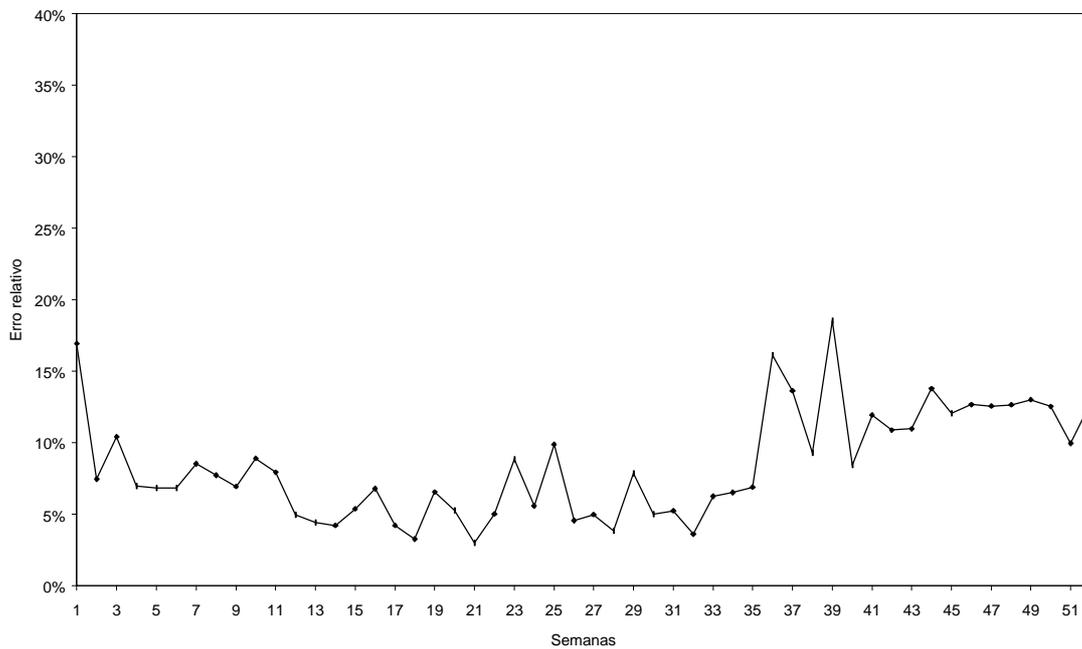


Figura 50 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o terceiro dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.

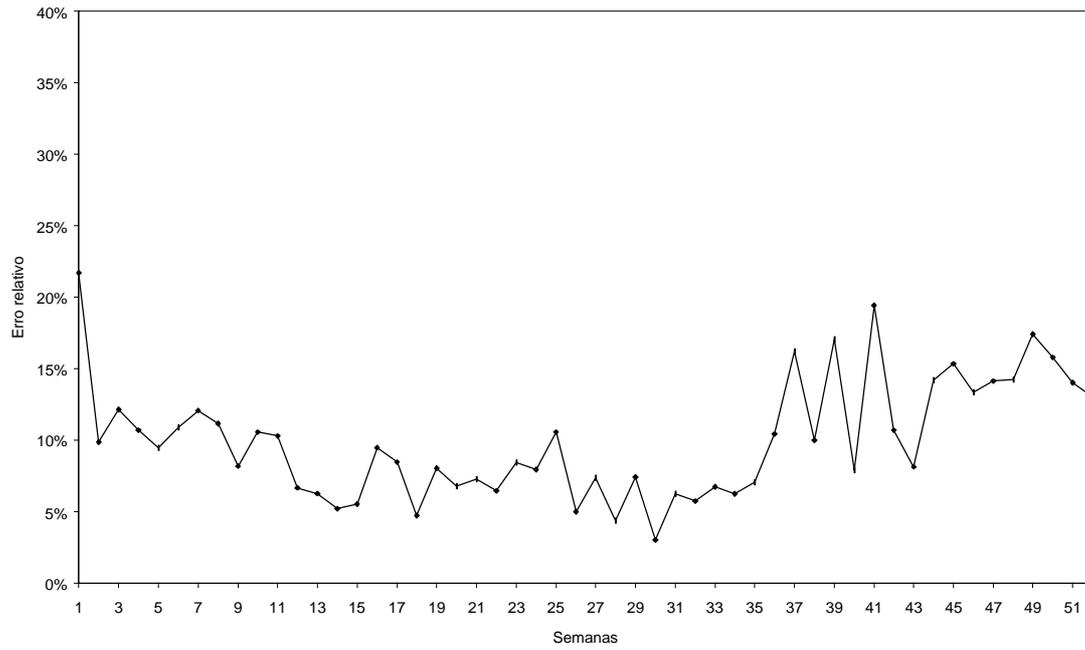


Figura 51 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quarto dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.

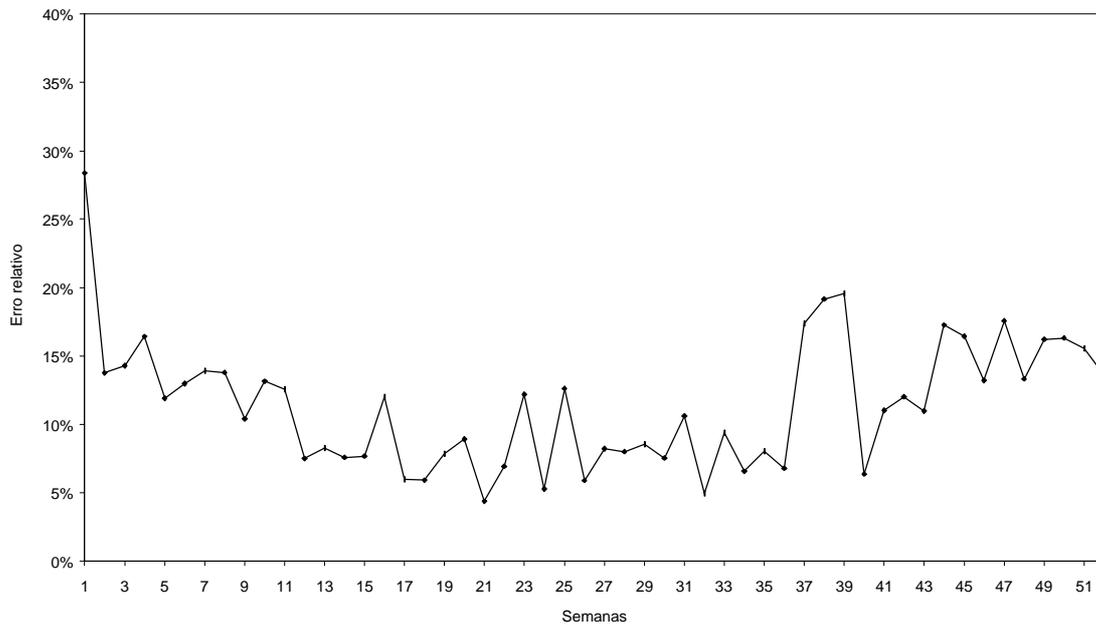


Figura 52 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o quinto dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.

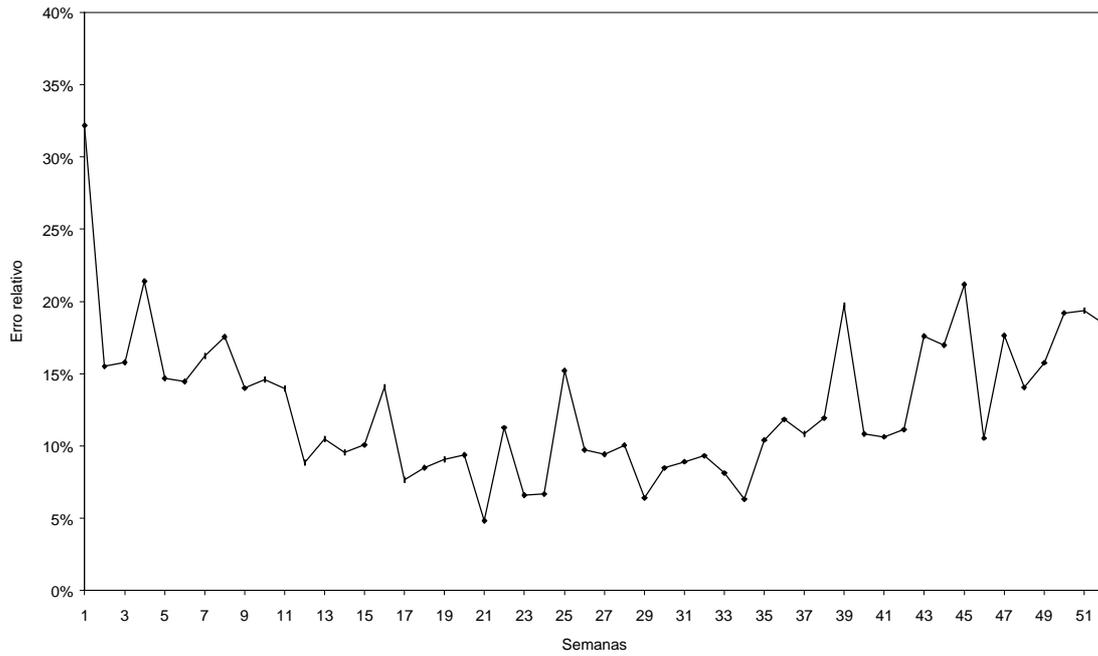


Figura 53 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sexto dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.

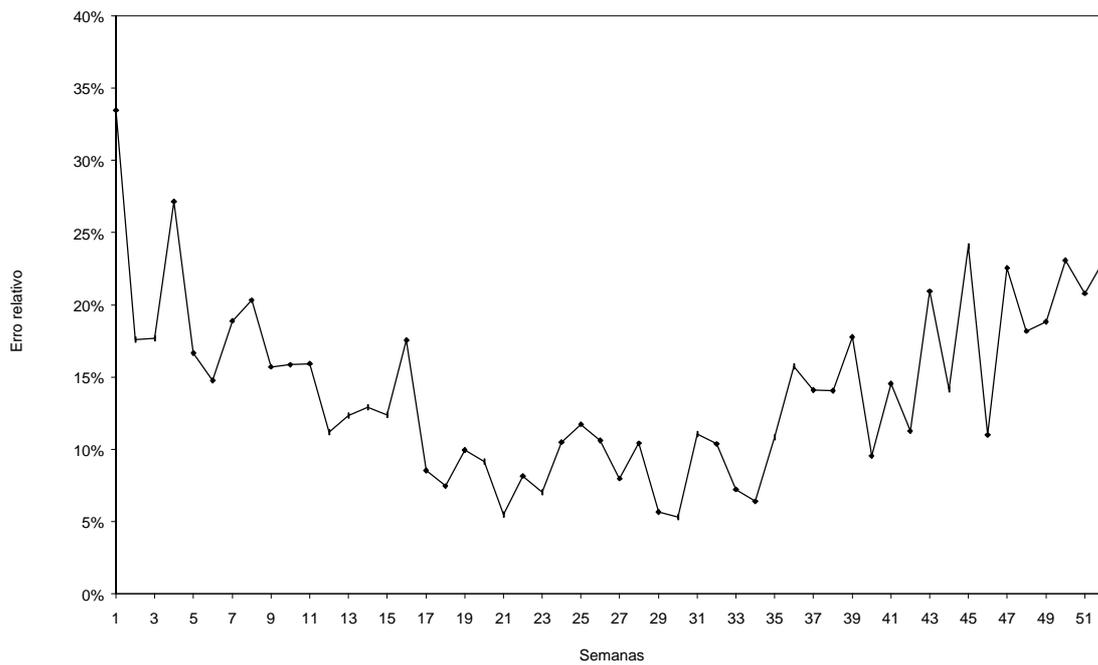


Figura 54 - Erros relativos médios em valores absolutos de previsão ao longo do ano para o sétimo dia da semana. Aproveitamento: Tucuruí. Período Analisado: 1985 a 1999.

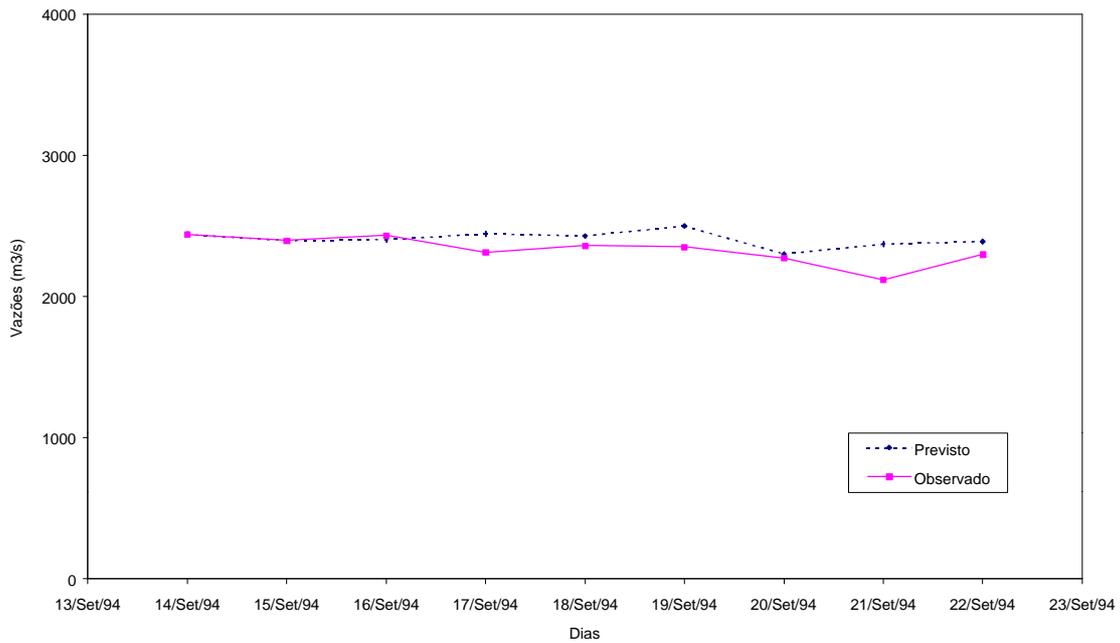


Figura 55 – Previsão para 7 dias. Aproveitamento: Jupiá. Período de transição seco/úmido.

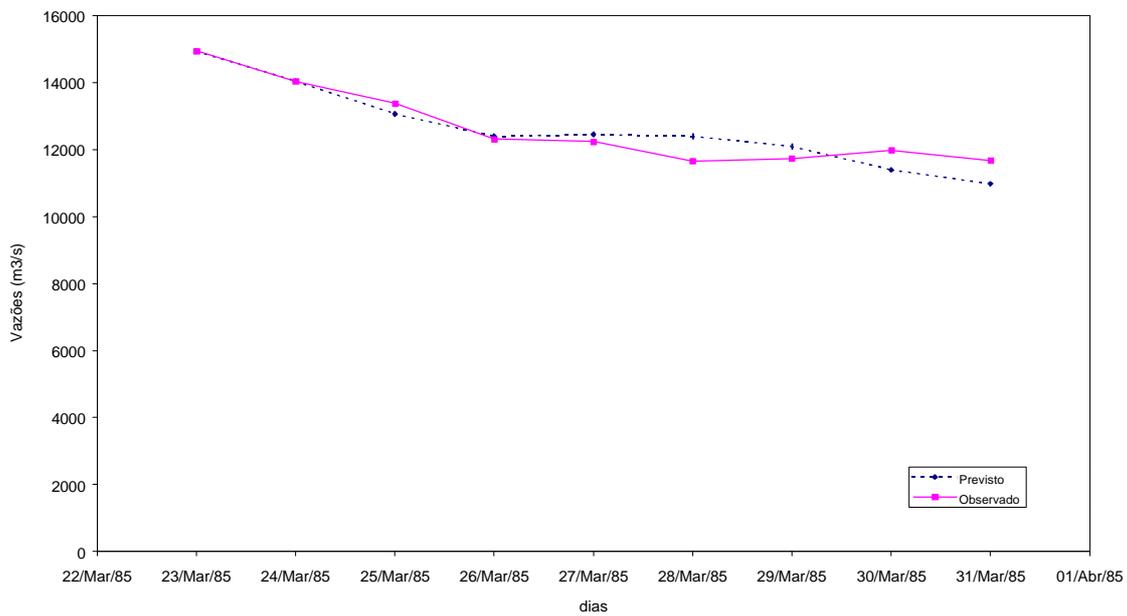


Figura 56 – Previsão para 7 dias. Aproveitamento: Jupiá. Período de transição úmido/ seco.

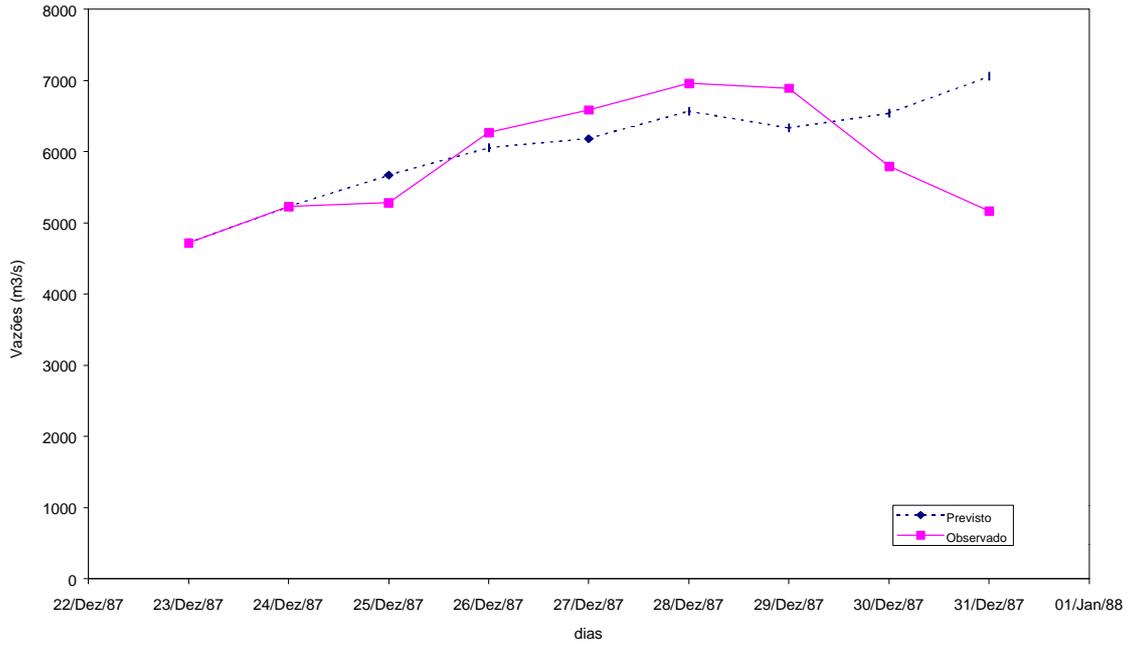


Figura 57 - Previsão para 7 dias. Aproveitamento: Jupιά. Período úmido.

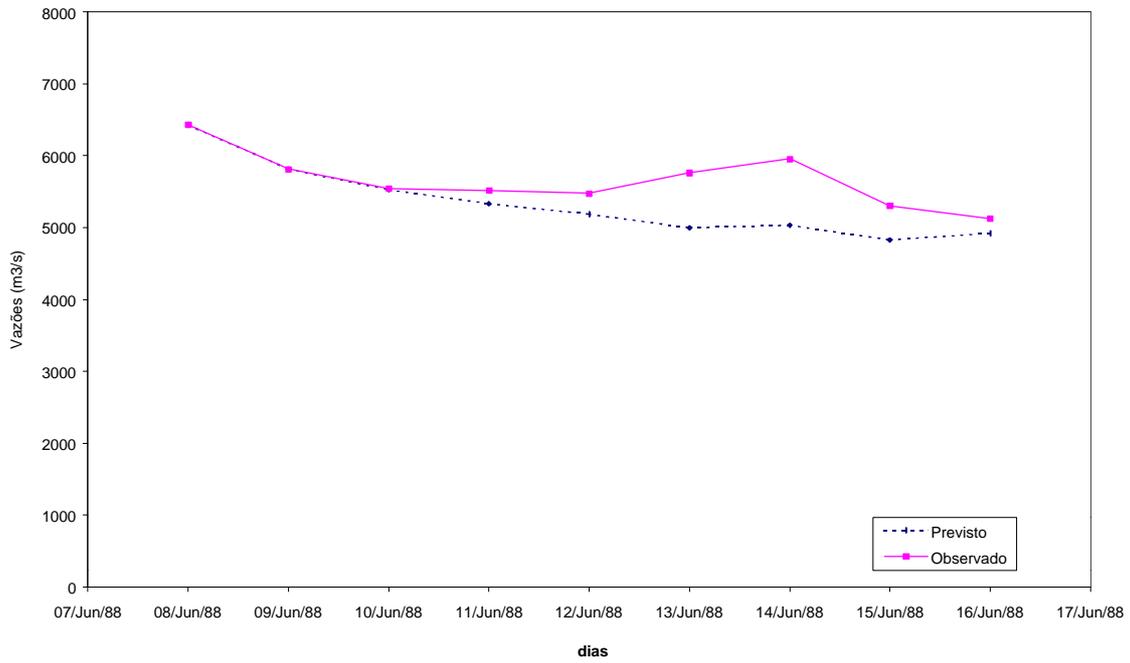


Figura 58 - Previsão para 7 dias. Aproveitamento: Jupιά. Período seco.

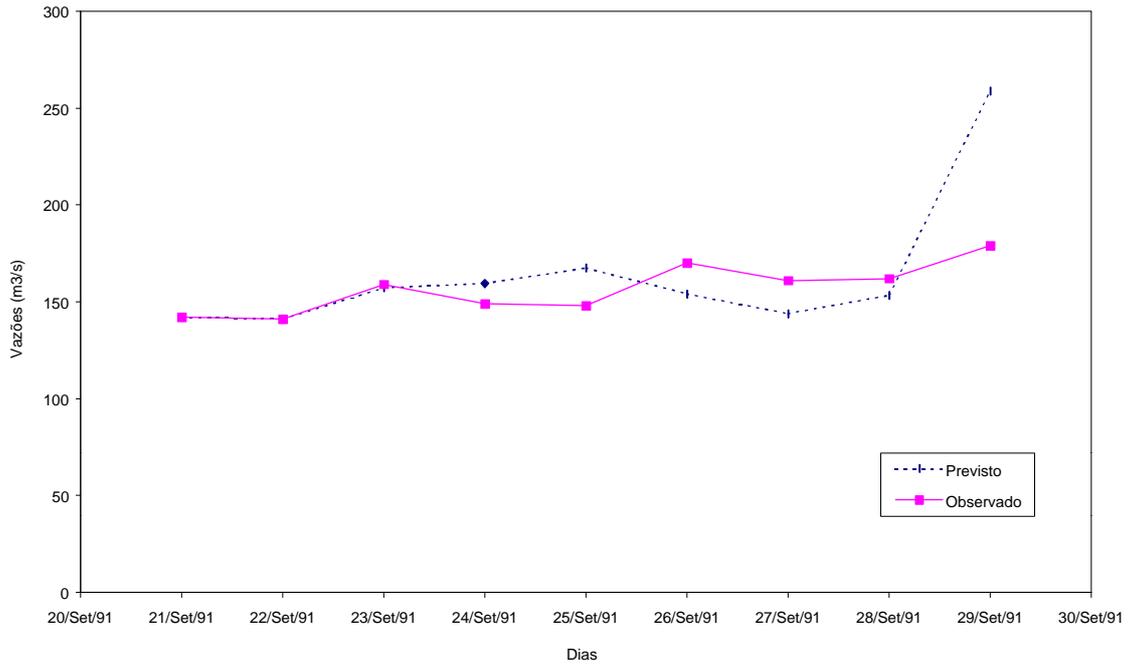


Figura 59 – Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Foz do areia. Período de transição seco/ úmido.

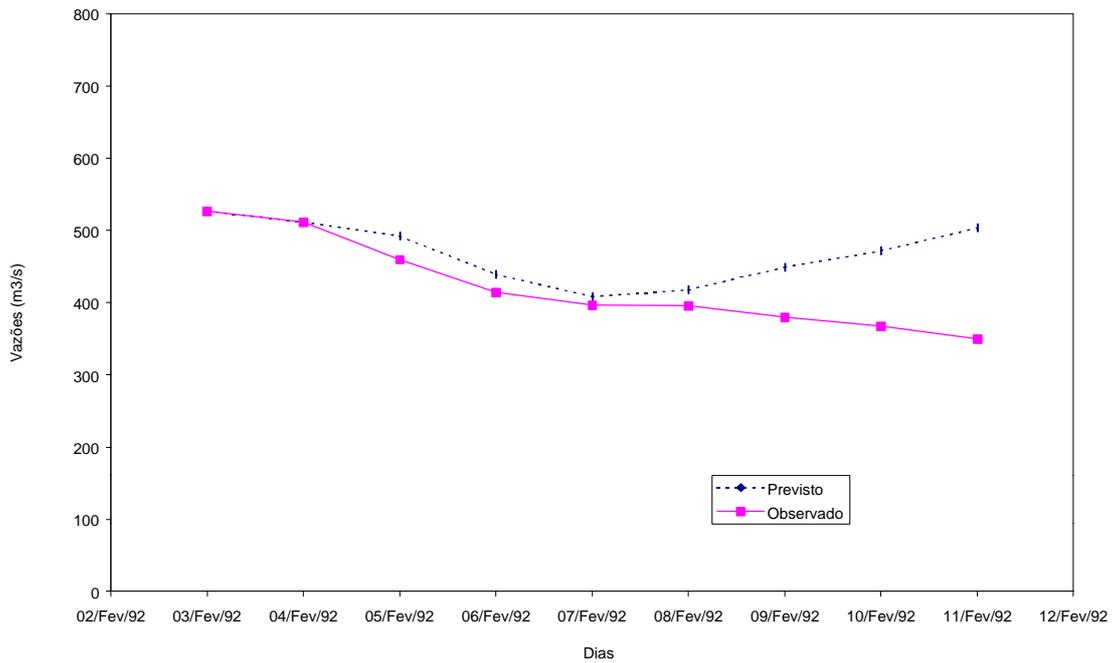


Figura 60 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Foz do areia. Período seco.

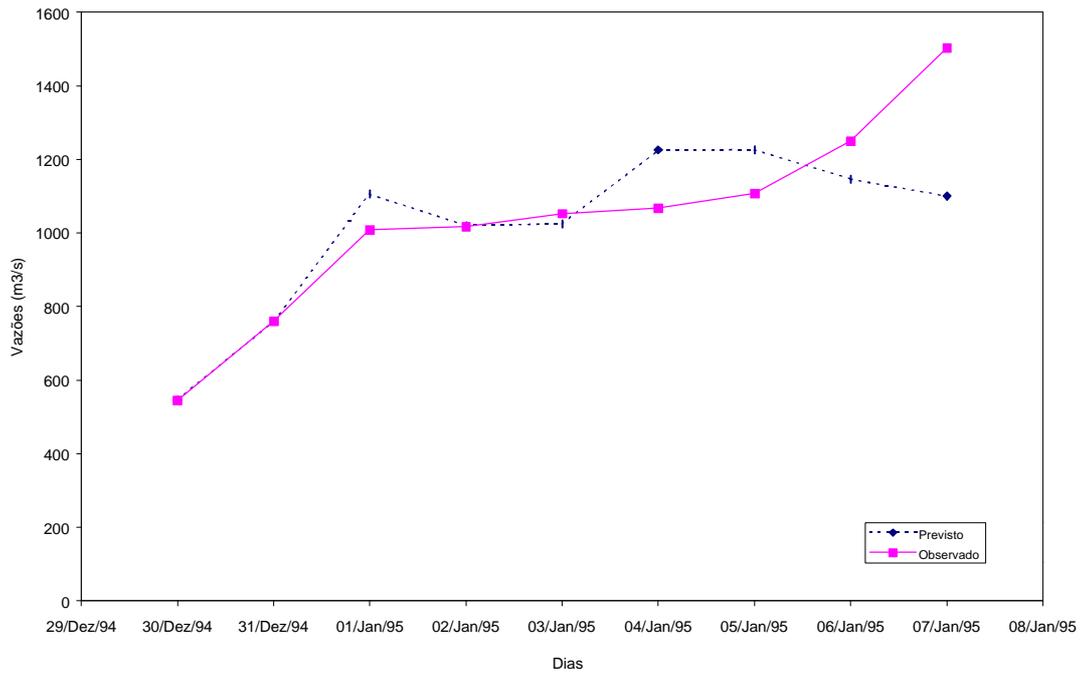


Figura 61 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Foz do areia. Período seco

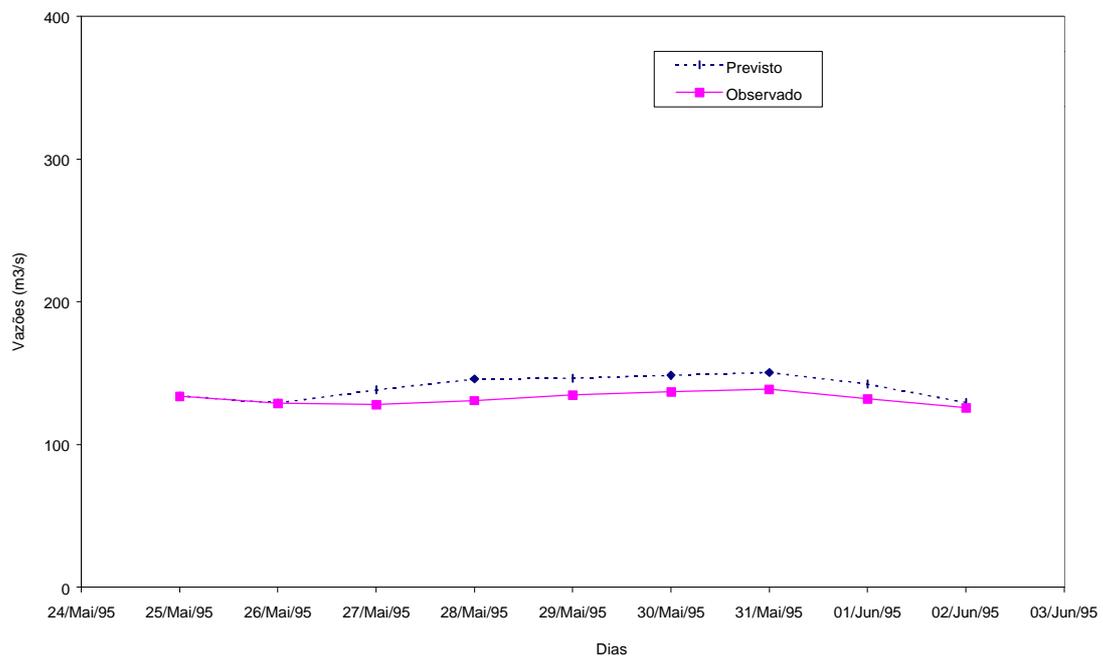


Figura 62 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Foz do areia. Período úmido.

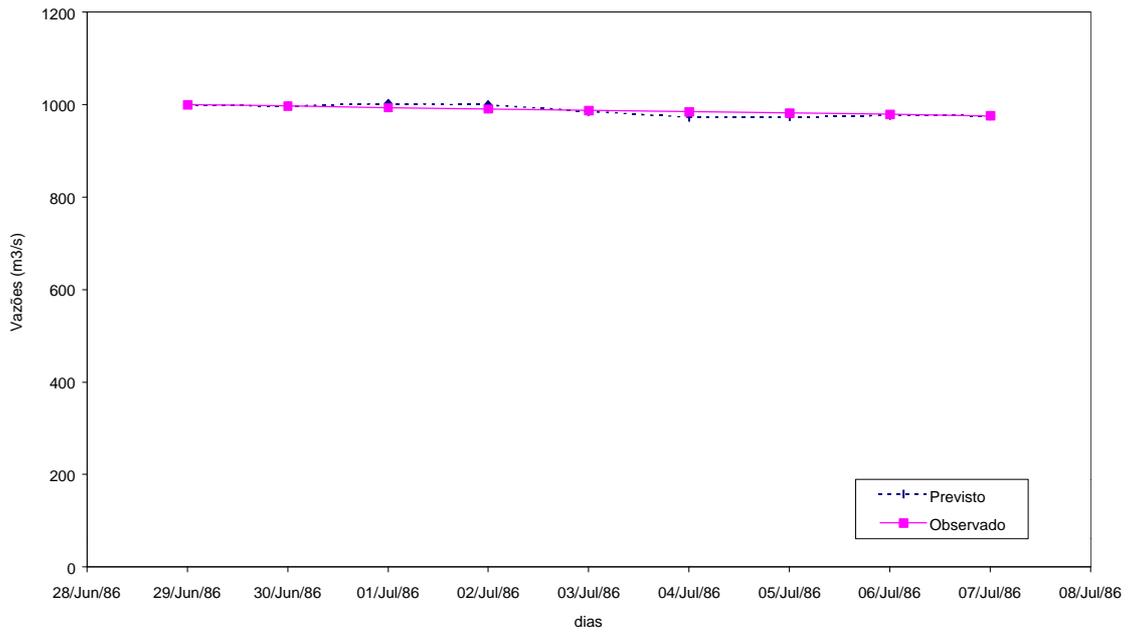


Figura 63 – Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Sobradinho. Período seco.

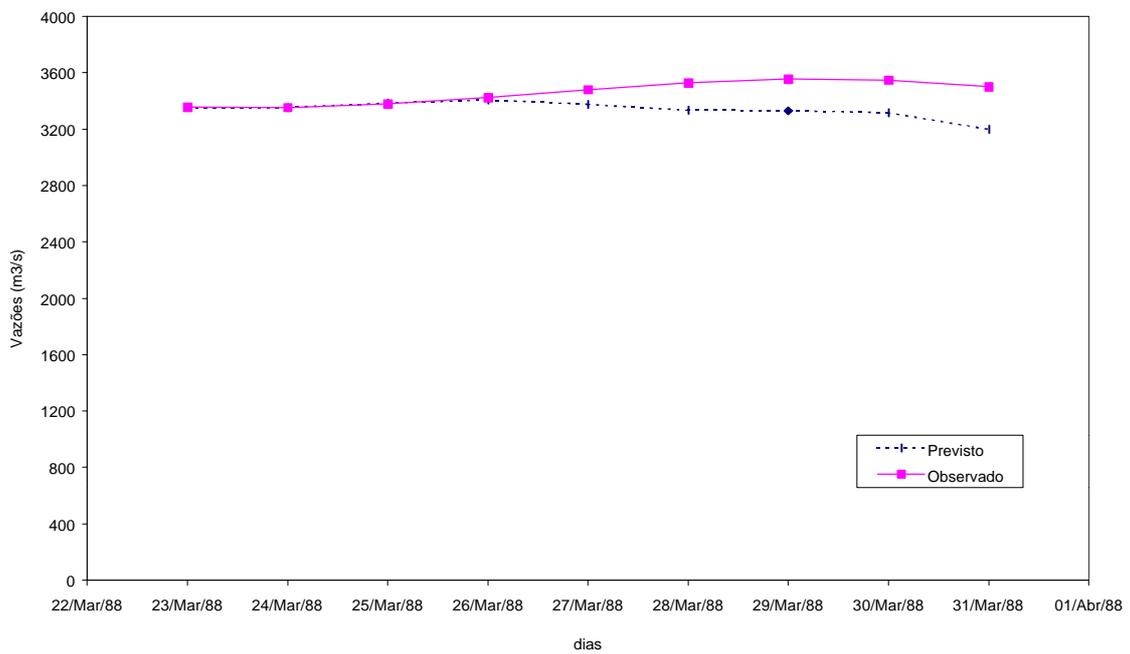


Figura 64 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Sobradinho. Período de transição úmido/ seco.

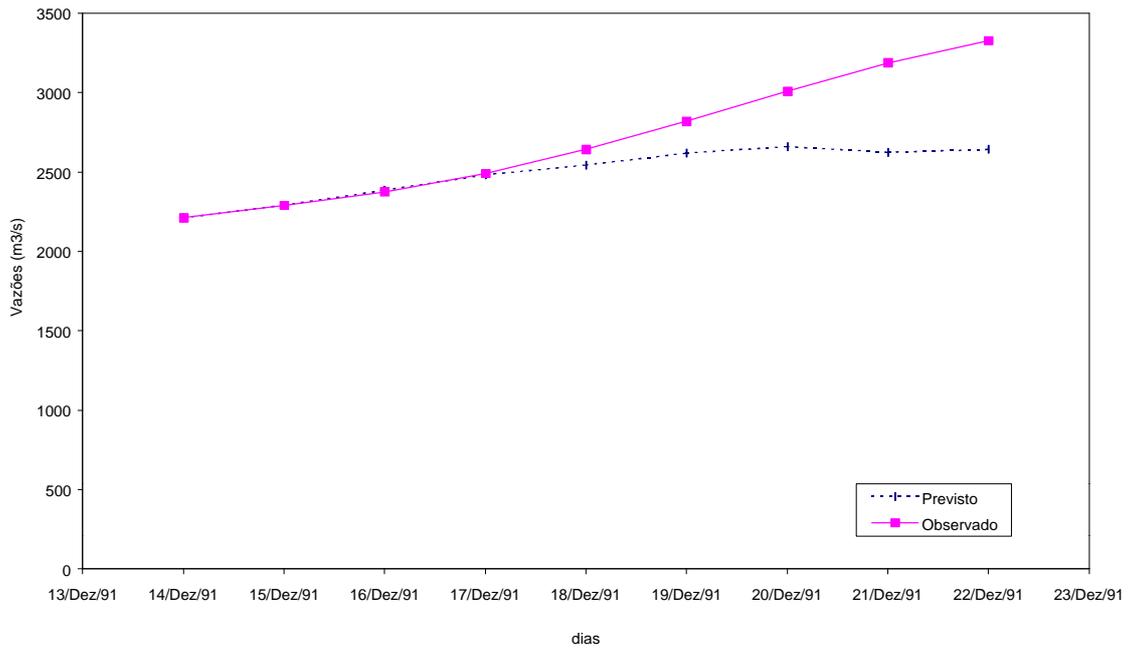


Figura 65 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Sobradinho. Período úmido.

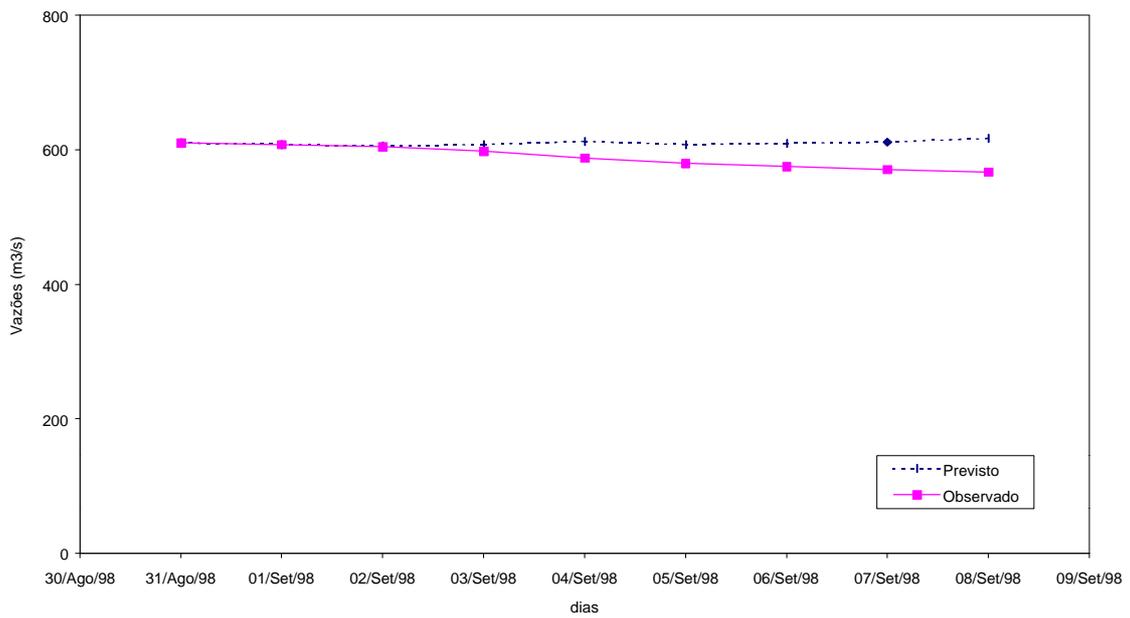


Figura 66 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Sobradinho. Período seco.

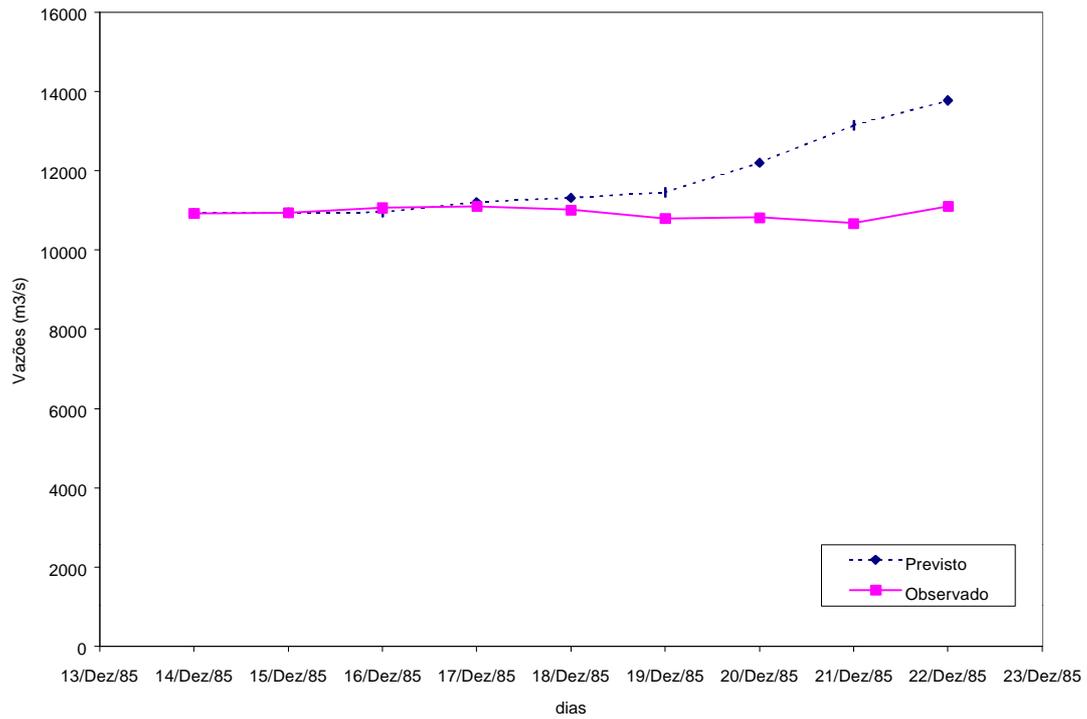


Figura 67 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Tucuruí. Período úmido.

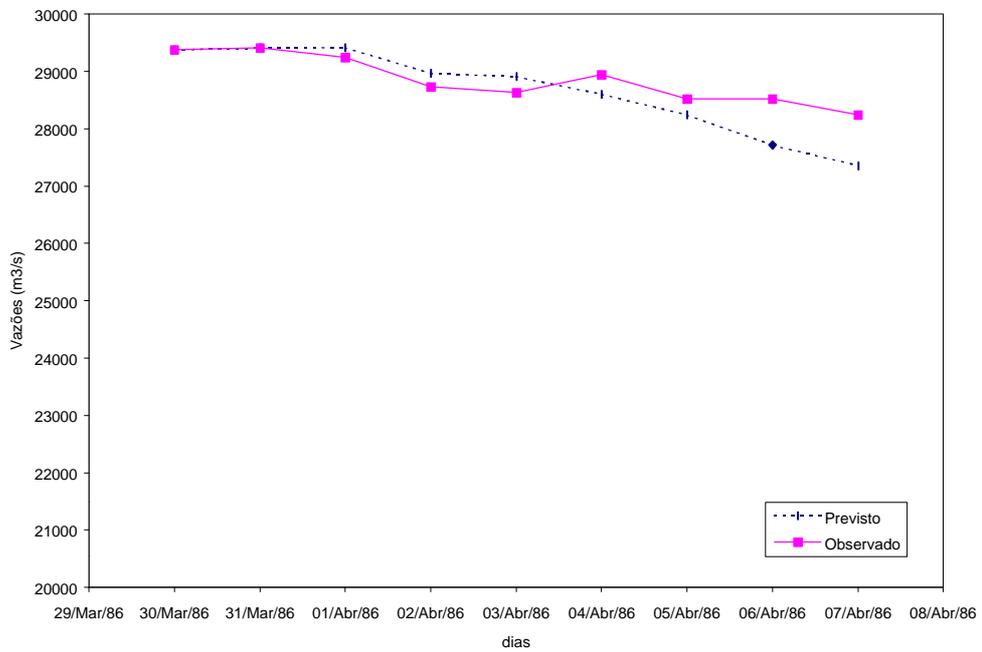


Figura 68 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Tucuruí. Período de transição úmido/ seco.

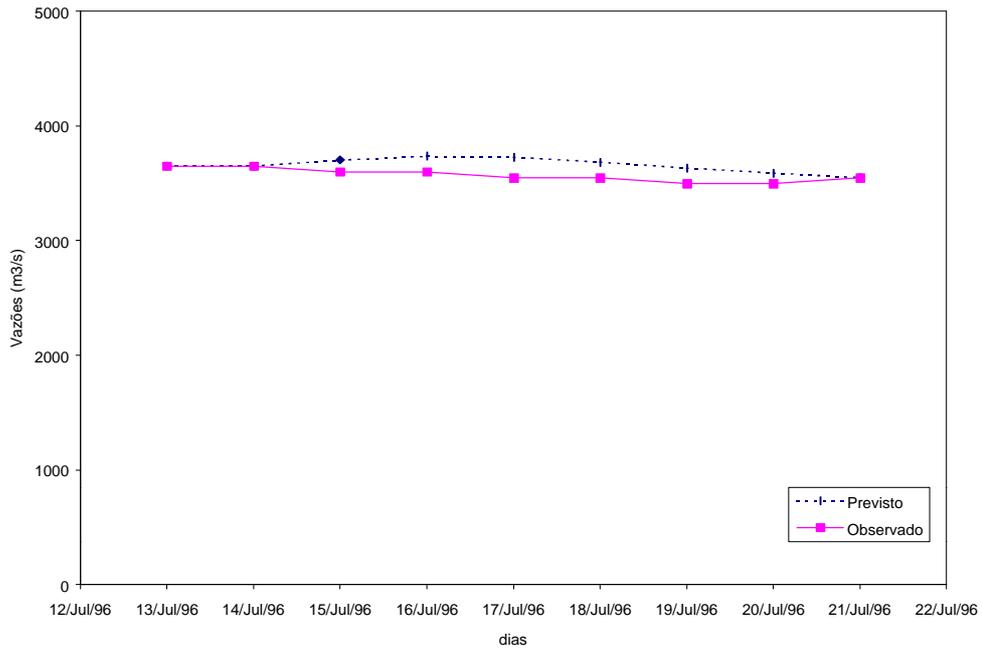


Figura 69 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Tucuruí. Período seco.

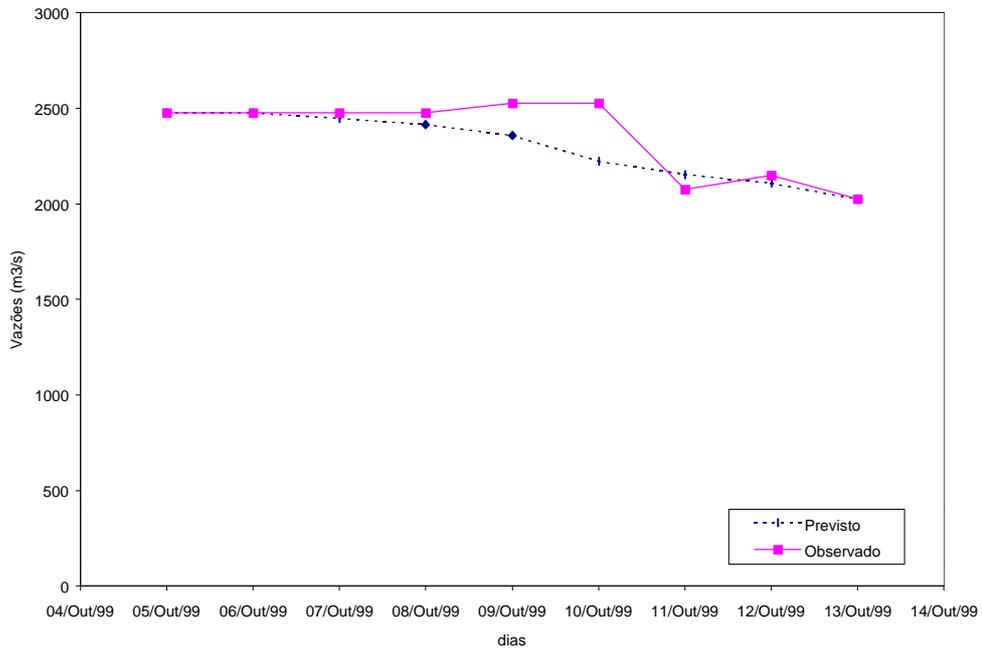


Figura 70 - Previsões para 7 dias. Aproveitamento: Tucuruí. Período de transição seco/ úmido.

Capítulo V

Conclusões e Recomendações

Esta tese teve como objetivo apresentar uma modelagem para previsão de afluências diárias de natureza estocástica, com um pequeno grau de complexidade, que tem como característica a desagregação de previsões de vazões semanais, utilizando técnicas de geração de cenários de 1 a 7 dias para previsão de vazões.

Os resultados da análise da previsão para os postos Jupuí, Foz do Areia, Tucuruí e Sobradinho, apresentaram resultados estimulantes que sugerem uma maior aplicação desta modelagem especialmente em locais onde as disponibilidades de dados para um bom ajuste de um modelo físico seja difícil.

A escolha dos aproveitamentos analisados procurou obedecer à dois critérios: representar as diferentes Bacias Hidrográficas brasileiras, com suas diferentes características e representar diferentes Sub-Sistemas Hidroenergéticos do Sistema Hidroelétrico Brasileiro. Daí explica-se a escolha dos aproveitamentos de Jupuí, pertencente a Bacia do RioParaná no Sub-Sistema Sudeste; Foz do Areia, pertencente a Bacia do Rio Iguaçu no Sub-Sistema Sul; Sobradinho, pertencente a Bacia do Rio São Francisco no Sub-Sistema Nordeste e Tucuruí, pertencente a Bacia do Rio Tocantins no Sub-Sistema Norte.

Para os casos analisados a modelagem apresentou bons resultados, principalmente para os aproveitamentos de Sobradinho e Tucuruí, onde os erros de previsão, especialmente nos primeiros dias, são muito baixos. Já no caso de Foz do Areia a modelagem apresenta maiores erros de previsão, fato este previsível dada característica errática das afluências no Rio Iguaçu.

Esta tese estimula a ampla aplicação da modelagem PREVIVAZH para um maior número de séries diárias afluentes a diferentes aproveitamentos hidrelétricos. Com uma maior aplicação da modelagem, novas adaptações podem ser definidas e adotadas resultando num menor erro de previsão.

Dentre as recomendações uma das mais promissoras é a consideração da previsão de chuva como mais um indicador na previsão de afluências. Este estudo pode fornecer ganhos muito grandes à previsão de afluências, uma vez corretamente considerado o erro das previsões de chuva para que este possa ser separado do erro final de previsão. Além desta recomendação, uma interessante linha de pesquisa à ser estudada seria previsão multivariada que incorporaria às previsões informações sobre a correlação espacial entre as vazões dos diferentes aproveitamentos.

Capítulo VI

Referências

ANEEL, SRH/IBAMA/MMA. Atlas Hidrológico do Brasil. Versão 1.0 – 1998.

COSTA, F. S.; DAMÁZIO J. M.; 1999 , *PREVIVAZH – Modelo Estocástico de Previsão de Vazões Diárias*, Especificação Técnica, Relatório Técnico DDP/PEL 591/99 CEPEL, Rio de Janeiro, 16p.

COSTA, F. S.; DAMÁZIO J. M., LIVINO DE CARVALHO, A. R. e DANTAS, H. M.; “PREVIVAZH – Modelo Estocástico de Previsão de Vazões Diárias”, In: *Trabajos Tecnicos* do Seminário Internacional sobre Hidrologia Operativa , CIER; Tema 3 – RT41 - Salto Grande, A.R., Maio 2000.

ELETROBRÁS, SIPOT - Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro. Base de dados Janeiro de 2001.

KELMAN, J., DAMÁZIO, J. M. e COSTA, J. P. “Geração de séries sintéticas de vazões diárias – Modelo DIANA.”, *Revista Brasileira de Engenharia*, v.1, n.2, pp.5-22, 1983.

KELMAN, J. , *Controle de Cheias e Aproveitamentos Hidrelétricos*, 1 ed. Rio de Janeiro, ABRH/ RBE, 1987.

LIVINO DE CARVALHO, A. R. “Modelo Estocástico de Previsão de Vazão Diária”, UFRJ, Escola de Engenharia, Departamento de Hidráulica e Saneamento da Engenharia Civil. Projeto Final de Curso. Outubro 1999.

MACEIRA, M.E.P.; DAMAZIO, J.M.; GHIRARDI, A. O.;1997, *Modelo de Previsão de Vazões Semanais Aplicado ao Sistema Hidroelétrico Brasileiro – PREVIVAZ*, Relatório Técnico DPP/PEL 125/97 CEPEL, Rio de Janeiro, R.J.

MÜLLER, F., 1997, *Geração Univariada de vazões diárias por métodos diretos*, Tese de M.Sc. em Engenharia Hidráulica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

O'CONNEL. P. E., *Real-time hydrological forecasting and control*; Proceedings of 1st International Workshop. Institute of Hydrology, Wallingford – Oxon UK, 1977.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, *homepage* acessada em 19/06/2001.
<http://www.ons.org.br/ons/sin/abertura2.htm>.

TUCCI, C. E. M., *Modelos Hidrológicos*. 1 ed. Porto Alegre, Universidade/ UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

VOGEL, RICHARD M. “Stochastic and Deterministic world views”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 125, n. 6, pp. 311-313, Dec. 1999.

Apêndice A

Breve Descrição do Modelo DIANA

A formulação do modelo DIANA baseia-se na idéia de que as vazões diárias podem ser decompostas em duas parcelas: uma parcela dependente de fatores externos (por exemplo: precipitação) e outra que representa o contínuo esvaziamento da bacia. A razão da utilização do modelo DIANA, estocástico de vazões diárias, é que ele é um modelo de pulsos empíricos que tem como gerador de pulsos, em dias considerados chuvosos, a distribuição empírica de $Q(t)/Q(t-1)$ ou $Q(t) - Q(t-1)$, conforme o caso. Este modelo resolve o problema da representação das ascensões da hidrógrafa, que são quase sempre mais abruptas que as recessões. Processos cujas características exibam esta propriedade são chamados irreversíveis no tempo.

Considera-se que a vazão no dia t da hidrógrafa de um dado posto fluviométrico é dada pela soma de dois componentes:

$$Q(t) = U(t) + O(t), t = 1, 2, \dots \quad (\text{A.1})$$

Idealmente, $U(t)$ dependeria principalmente de fatores externos (ex.: precipitações) cuja natureza intermitente ocasionaria na hidrógrafa, pulsos irregulamente espaçados no tempo. Por outro lado, $O(t)$ representaria o contínuo esvaziamento da água armazenada na bacia hidrográfica.

O modelo DIANA considera a ocorrência de $u(t)$ positivo, sempre que $q(t) > \lambda q(t-1)$, onde $0 \leq \lambda \leq 1$ sendo λ , a *taxa de recessão característica* do posto fluviométrico.

Para qualquer λ a opção implica que:

$$\begin{aligned} u(t) &= 0 && \text{se } q(t) \leq \lambda q(t-1) \\ u(t) &= q(t) - \lambda q(t-1) && \text{se } q(t) > \lambda q(t-1) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Nos dias em que atuam fatores externos ($u(t) > 0$), a vazão total é dada por:

$$q(t) = \lambda q(t-1) + u(t), \quad u(t) > 0 \quad (\text{A.3})$$

e, portanto:

$$O(t) = \lambda q(t-1), \quad u(t) > 0 \quad (\text{A.4})$$

Nos dias em que não atuam fatores externos ($u(t) = 0$), a vazão total é dada simplesmente por $O(t)$, o qual pode ser considerado como a soma das defluências de dois reservatórios lineares, cada parcela dependendo de $q(t-1)$ através de uma equação probabilística. Esta abordagem pode ser simplificada considerando-se apenas um reservatório linear de comportamento estocástico. Assim, quando $u(t) = 0$, $O(t)$, e, portanto, $q(t)$, é uma fração $k(t) \leq \lambda$ da vazão anterior:

$$q(t) = O(t) = k(t) q(t-1), \quad k(t) \leq \lambda; \quad u(t) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Juntando-se as equações (1), (3) e (5) o modelo DIANA pode ser escrito por:

$$\begin{cases} q(t) = u(t) + k(t)q(t-1) \\ u(t) = 0 \Rightarrow k(t) \leq \lambda \\ u(t) > 0 \Rightarrow k(t) = \lambda \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

Existem dois aspectos a serem considerados na modelagem do processo $U(t)$:

- i) Definir sua distribuição de probabilidade marginal, levando-se em conta que existe uma probabilidade finita de p de que $U(t)$ seja exatamente igual a zero;
- ii) Preservar a dependência entre valores sucessivos de $U(t)$, visto que os fatores externos que influenciam os ramos ascendentes da hidrógrafa, podem resultar da ação de fenômenos meteorológicos persistentes sobre a bacia hidrográfica (exemplo: frente fria estacionária).

O modelo DIANA adota a própria distribuição empírica, $F_U(\cdot)$, visto que usualmente dispõe-se de um grande número de observações de $u(t)$. Quanto à questão da dependência entre $U(t-1)$ e $U(t)$, o modelo DIANA, assume a existência de um processo autoregressivo normal de ordem 1 com censura, cujo coeficiente de

autocorrelação r deve ser preservado. Este processo é mapeado em $U(t)$ através de uma transformação não-paramétrica, que deve preservar a distribuição empírica $F_U(\cdot)$, conforme a seguir exposto.

Seja o processo markoviano $Z(t)$ definido por:

$$z(t) = \rho z(t-1) + z \sqrt{1 - \rho^2} \varepsilon(t) \quad (\text{A.7})$$

onde $\varepsilon(t)$ é um ruído normal padrão e r a correlação lag-1 do processo markoviano.

Seja o processo $Y(t)$ resultado de uma censura imposta ao processo $Z(t)$ definida por:

$$\begin{aligned} y(t) &= z(t) && \text{se } z(t) > \beta \\ y(t) &= \beta && \text{se } z(t) \leq \beta \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

$$\beta = \Phi^{-1}(p)$$

onde β define o intervalo de censura $(-\infty, \beta)$, $\Phi(\cdot)$ é a distribuição acumulada normal, e $p = P[u(t)=0]$.

A relação entre $U(t)$ e $Y(t)$ é obtida resolvendo-se $F_U(u) = \Phi(y(t))$.

Para a modelagem da série de $k(t)$'s assume-se que seja suficiente simplesmente usar para a geração de valores sintéticos a distribuição empírica de $k(t)$ menor que I , $F_K(\cdot)$, sempre que $u(t) = 0$.

A.1 Geração Condicionada de Seqüências de Vazões Diárias

Pelo algoritmo do DIANA exposto acima, para a obtenção da vazão do dia $t=1$ parte-se do sorteio de $q(0)$. Este procedimento é razoável, quando o modelo está sendo utilizado para gerar cenários igualmente prováveis de vazões diárias, imaginando-se que se parte de um ponto qualquer, não se tendo como objetivo preservar o comportamento das últimas vazões, que realmente ocorreram.

Quando o objetivo é utilizar as sequências sintéticas de vazões diárias, para desagregação da previsão da vazão semanal e considerar a desagregação como previsão das vazões diárias da próxima semana, é importante levar-se em consideração a informação presente nas últimas vazões diárias observadas. Neste caso, como $q(0)$ está disponível, o passo (i) não é necessário.

Como além de $q(0)$, $q(-1)$ também está disponível, no passo (ii), o sorteio de $z(0)$ é substituído por uma estimativa de $z(0)$ fornecida segundo o seguinte algoritmo:

- calcular $k(0)$ por

$$k(0) = q(0) / q(-1),$$

- obter $u(0)$ de:

$$\text{se } k(0) < \lambda, \text{ então } u(0)=0;$$

$$\text{se } k(0) \geq \lambda, \text{ então } u(0) = q(0) - \lambda q(-1).$$

- obter $y(0)$ através de:

$$F_U(u(0)) = \Phi(y(0))$$

- obter $z(0)$ de:

$$\text{se } y(0) > \beta, z(0) = \beta, \text{ caso contrário sorteia-se } z(0) \text{ da } N(0, 1/(1-\rho^2)^{-1}).$$

Apêndice B

Correção de Discrepâncias nos Histórico de Vazões Diárias

Conforme descrito no Capítulo IV, para análise e validação da modelagem durante esta tese, foram feitas várias análises e vários testes, tomando como base os dados históricos de vazões afluentes diárias a alguns reservatórios, considerados representativos das diferentes bacias hidrográficas, que contém alguns aproveitamentos hidrelétricos do Sistema Elétrico Brasileiro.

Durante a análise dos erros de previsão, para as diferentes semanas ao longo do ano, para cada dia da semana, foi possível observar valores discrepantes no histórico, isto é, valores que geravam erros da ordem de 1.100% em alguns casos. Nestes casos, uma investigação desses valores no histórico foi feita e em alguns casos um possível erro de leitura, ou de consistência, ou até de digitação dos dados, foi detectado. O seguinte critério foi adotado para correção: para o dia com o valor discrepante foi adotado a média entre os seus valores vizinhos, isto é, para o dia_i foi adotado o valor:

$$dia_i = \frac{dia_{i+1} + dia_{i-1}}{2} \quad (B.1)$$

A seguir, as tabelas apresentam os valores antes e depois da correção. As tabelas podem ser descritas da seguinte forma: a primeira linha contém a data da ocorrência dos valores, a segunda linha apresenta os valores para o trecho da série histórica de vazões diárias, no qual ocorre a tal discrepância (destacada em negrito) e a terceira linha apresenta o trecho da série histórica de vazões diárias, com o valor corrigido.

Foram feitas correções nos históricos de aflúncias diárias aos aproveitamentos de Tucuruí, Jupia e Sobradinho. Para o aproveitamento de Foz do Areia, apesar de terem sido detectados valores discrepantes, foi adotado não corrigir estes valores pois o

comportamento das vazões do Rio Iguaçu é muito variável, o que pode levar à bruscas variações de valores de vazões de um dia para o outro.

Tabela 6 – Alterações feitas nos históricos de afluições diárias.

Aproveitamento	Localização do erro			Valor no histórico diário (m ³ /s)		Valor no histórico semanal (m ³ /s)	
	Ano	Semana	Dia	Anterior	Corrigido	Anterior	Corrigido
Tucuruí	1986	39	3	25410	2541	5816,3	2549,3
Tucuruí	1995	24	5	1200	12000	10600	12142,9
Tucuruí	1995	52	6	4320	10750	9831,43	10750
Tucuruí	1997	1	3	80099	6473	17400,6	6883
Tucuruí	1997	21	5	1996	19960	19306,7	21873
Sobradinho	1998	41	7	800	530	544	505
Jupiaá	1986	49	7	7817	6868	6743	6607
Jupiaá	1993	46	1	4504	3867	3326	3235
Jupiaá	1998	45	1	5481	3761	4203	3957
Jupiaá	1999	51	6	2495	4244	4786	5036