

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Pesquisas Hidráulicas

**PREVISÃO HIDROCLIMÁTICA DE VAZÃO PARA
A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO**

BENEDITO CLÁUDIO DA SILVA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Morelli Tucci

Co-orientador: Prof. Dr. Walter Collischonn

Banca Examinadora

Prof. André Luiz Lopes da Silveira	IPH/UFRGS
Prof. Osvaldo Luiz Leal de Moraes	UFSM
Prof. Afonso Henriques Moreira Santos	UNIFEI
Prof. José Almir Cirilo	UFPE

Porto Alegre, Outubro de 2005

Esse trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do prof. Carlos Eduardo Morelli Tucci e co-orientação do prof. Walter Collischonn da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- “- O rio tem muitas vozes, um sem número de vozes;
... Não te parece que ele tem a voz de um rei e a
de um guerreiro, a voz de um touro e a de uma
ave noturna, a voz de uma parturiente e a de um
homem que respira, e inúmeras outras ainda?*
- Tens razão, na sua voz concentram-se as vozes de
todas as criaturas.*
- E tu? Sabes identificar a palavra que ele dirige a ti,
sempre que consegues ouvir simultaneamente
todas as dezenas de milhares de suas vozes?”*

Herman Hesse – *Sidarta*.

AGRADECIMENTOS

Após o término desse trabalho, tenho a convicção que o sucesso alcançado se deve ao ambiente extremamente favorável para pesquisa que encontrei no IPH. A existência de um ambiente com estrutura adequada e pessoas acessíveis, e competentes, em diferentes setores foi um fator determinante para minha formação. Muitas pessoas contribuíram, de forma direta ou indireta, para a concretização desse trabalho. Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram com críticas e sugestões.

Agradeço em especial aos Profs. Carlos Tucci e Walter Collischonn, pela amizade e por me concederem a honra de ser orientado por pesquisadores tão brilhantes.

Um agradecimento especial também ao Prof. Robin Clarke, pela oportunidade em auxiliá-lo e de assimilar, mesmo que uma pequena fração, de seu vasto conhecimento de estatística.

Aos demais professores do IPH, pela dedicação, paciência e disponibilidade com que sempre me atenderam. Em especial aos professores André Silveira, Joel Goldenfun, Alfonso Risso e Beatriz.

Aos amigos de convivência diária: Dante Larentis, Laura Aciolli, Adriano Rolim Paz, Eduardo Bueno, Joana D'arc Medeiros, Rutinéia Tassi, Bruno Collischonn, Daniel Allasia, Marllus Das Neves, Nicolás, Martin Delgado, Martin Bravo, Nilson, Adalberto, Diogo, Ruberto, Christopher, Fernando, Jean Ricardo, Diego, Ane e muitos outros. A amizade de todos é certamente a maior riqueza que levo do IPH.

Também considero importante salientar que o sucesso dessa pesquisa se deve a um trabalho extenso e coordenado de pesquisadores de outras instituições, em conjunto com o IPH, sem os quais não seria possível realizá-la. A partir do trabalho dessas pessoas, os primeiros resultados promissores da previsão de vazão com base em previsão de precipitação (previsão hidroclimática), foram obtidos em uma pesquisa desenvolvida para a bacia do rio Uruguai. O estudo foi financiado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e desenvolvido em conjunto pelo IPH/UFRGS, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP). Por esse motivo, a ANEEL e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) financiaram o projeto de previsão para a bacia do rio São Francisco, com intuito de consolidar a metodologia desenvolvida no trabalho do rio Uruguai, além de complementá-la. A presente

tese é um dos produtos desse segundo projeto e, por isso, faço um agradecimento especial as seguintes pessoas, que participaram desses esforços e desenvolveram partes importantes desta pesquisa:

- Aos pesquisadores do CPTEC, Gilvan Sampaio, Chou Sin Chan, José Marengo e Javier Tomasella, que realizaram as previsões de precipitação com os modelos atmosféricos e repetidas vezes esclareceram minhas dúvidas sobre previsão de tempo e clima.
- Ao Carlos Renato do CPTEC, que pacientemente me auxiliou no extenso trabalho de leitura dos arquivos de previsão climática.
- Ao Prof. Pedro Dias do IAG/USP por compartilhar um pouco de seu conhecimento sobre tempo e clima, fornecendo contribuições sempre valorosas, e pelas previsões do modelo BRAMS utilizadas no relatório do projeto ANEEL/OMM.
- Aos Engs. Carlos Alexandre e Luziel Arruda (ANEEL), Giovanni Acioli e Luiz Guillon (ONS) pelas contribuições técnicas no entendimento da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) e pela disponibilização de dados imprescindíveis à pesquisa.

Aos professores da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Augusto Nelson C. Viana, Afonso Henriques M. Santos e Geraldo L. Tiago Filho, pela confiança, incentivo e apoio que sempre me transmitiram.

Ao CNPq / CTHIDRO pela concessão da bolsa de estudos.

E, finalmente, um agradecimento especial a minha família: a meus pais Olympio e Helena pelos sacrifícios e pela sabedoria com que me orientaram para a vida; a minhas irmãs Vanessa e Eugênia pela fonte inesgotável de alegria; e a minha esposa Cláudia pela paciência e dedicação nos momentos difíceis e por seu imenso amor.

RESUMO

A previsão da vazão com base na previsão de precipitação permite uma antecedência maior do que outros métodos, mas exige modelos mais sofisticados e investimentos em monitoramento. Somente com o aprimoramento dos modelos atmosféricos e hidrológicos determinísticos nos últimos anos, criaram-se oportunidades consistentes de ampliar a antecedência da previsão através da integração desses modelos. Esse trabalho tem por objetivo principal o aprimoramento da metodologia de integração dos modelos atmosféricos e hidrológicos (*previsão hidroclimática*), para a previsão de vazões de curto prazo (14 dias) e longo prazo (até 6 meses). Para isso, o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH foi ajustado a bacia do rio São Francisco (cerca de 639.000 km²) e utilizaram-se previsões de precipitação do modelo de circulação geral atmosférico (AGCM) e do modelo regional ETA, operados pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC, como dados de entrada para o modelo hidrológico.

Foram feitas previsões para toda bacia, mas os resultados foram analisados com enfoque nas usinas de Três Marias e Sobradinho. Para as previsões de vazão de curto prazo, foram usadas previsões de precipitação do modelo ETA com alcance de 10 dias e produziram-se previsões de vazão média semanal para até duas semanas em Três Marias e quatro semanas em Sobradinho, sendo que após o décimo dia considerou-se chuva igual a zero. Os resultados mostram que as previsões são muito boas nas duas usinas e o modelo é capaz de estimar eventos que os modelos estocásticos têm grande dificuldade. Os erros da previsão de curto prazo foram modelados através de modelos estocásticos e de função de transferência para corrigir a vazão prevista, com resultados bastante satisfatórios em ambas as usinas.

Para previsão de longo prazo, foram usadas previsões climáticas dos modelos AGCM e regional ETA com 6 meses de antecedência. As previsões de vazão foram feitas para a mesma antecedência e comparadas em intervalos mensais, ou maiores, com o modelo estocástico PREVIVAZM do Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS). Os resultados em Três Marias mostram que o modelo hidroclimático, com chuva do AGCM, não demonstra vantagens e relação ao PREVIVAZM. Em Sobradinho o modelo hidroclimático com chuva AGCM apresenta pequena vantagem, mas que é significativa somente para antecedências de até 2 meses. Com o uso da chuva gerada pelo modelo ETA os resultados foram inferiores ao PREVIVAZM, em ambas as usinas e para todas as antecedências.

ABSTRACT

The flow forecast based in precipitation forecast permits larger antecedence than other methods, but more sophisticated models and investments in measurements and transmission of data are needed. Only with the improvement of the atmospheric and hydrologic deterministic models, in the last few years, consistent opportunities were generated to amplify the forecasts lead times, by the integrations of these models. The main objective of this research is to improve the integration methodology between atmospheric and hydrologic models (*hydroclimatic forecast*), to short-term flow forecasts (up to 14 days) and long-term flow forecast (up to 6 months). To this, the MGB-IPH distributed hydrologic model was adjusted to the São Francisco River basin (639000 km²). Precipitation forecasts generated by atmospheric general circulation model (AGCM) and ETA regional model, from Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, were used as input data for the hydrologic model.

Forecasts were made for the entire basin, but the results were analyzed in details to Três Marias and Sobradinho dams. Precipitation forecasts of ETA model up to 10 days were used for the short-term flow forecasts. Weekly flow forecasts were produced up to 2 weeks for Três Marias and 4 weeks for Sobradinho, after 10 days of forecast the precipitation was considered equal to zero. The results show that forecasts are very good to both dams and the model is able to estimate events that stochastic models have great difficult to represent. The errors of short-term forecasts were modeled by stochastic and transfer functions models to improve the forecasted flow, with very satisfactory results to both dams.

For the long-term flow forecasts, 6 months lead time climatic forecasts of AGCM and ETA models, both from CPTEC, were used. The flow forecasts were made for 6 months lead too and compared in monthly intervals, or larger, with the PREVIVAZM stochastic model from the Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). The results to Três Marias show that the hydroclimatic model, with AGCM rainfall, does not have advantages in relation to PREVIVAZM. To Sobradinho the hydroclimatic model, with AGCM rainfall, presents little advantage, but it is significant only for 2 months lead time. Using precipitation generated by ETA model, the results were worse than PREVIVAZM in both dams and for all the lead times.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS	4
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	4
2	PREVISÃO DE VAZÃO	6
2.1	PREVISÃO DE CURTO PRAZO	6
2.2	PREVISÃO DE LONGO PRAZO.....	8
2.3	MODELOS DE PREVISÃO DE VAZÃO	9
2.3.1	<i>Modelos para previsão de curto prazo</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>Modelos para previsão de longo prazo</i>	<i>11</i>
2.3.3	<i>Atualização das variáveis do modelo hidrológico.....</i>	<i>12</i>
2.3.4	<i>Previsão dos resíduos (atualização da vazão prevista).....</i>	<i>14</i>
2.4	MODELOS HIDROLÓGICOS PARA GRANDES BACIAS	15
2.5	RESUMO DO CAPÍTULO.....	17
3	PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO.....	19
3.1	PREVISIBILIDADE ATMOSFÉRICA	19
3.1.1	<i>Previsão de tempo</i>	<i>21</i>
3.1.2	<i>Previsão climática</i>	<i>24</i>
3.1.3	<i>Previsão de tempo estendida (previsão mensal).....</i>	<i>28</i>
3.2	MODELOS DINÂMICOS DE PREVISÃO DA PRECIPITAÇÃO	29
3.2.1	<i>Modelos de Circulação Geral (GCM).....</i>	<i>31</i>
3.2.2	<i>Modelos regionais de previsão (“downscaling”).....</i>	<i>34</i>
3.2.3	<i>Previsão por conjunto (“ensemble forecast”).....</i>	<i>36</i>
3.3	RESUMO DO CAPÍTULO.....	38
4	PREVISÃO HIDROCLIMÁTICA.....	41
4.1	INTEGRAÇÃO DOS MODELOS ATMOSFÉRICOS E HIDROLÓGICOS	42
4.1.1	<i>Erros na precipitação prevista</i>	<i>45</i>
4.2	PROPOSTA METODOLÓGICA DE PREVISÃO HIDROCLIMÁTICA	49
4.2.1	<i>Modelos e períodos de previsão</i>	<i>52</i>
4.3	RESUMO DO CAPÍTULO.....	54
5	SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	56
5.1	BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO: DESCRIÇÃO	56
5.1.1	<i>Características climáticas</i>	<i>58</i>
5.2	DADOS HIDROLÓGICOS E METEOROLÓGICOS	61
5.2.1	<i>Séries de vazão</i>	<i>61</i>
5.2.2	<i>Séries de precipitação e variáveis meteorológicas.....</i>	<i>63</i>
5.3	CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE SOLOS.....	64
5.4	CLASSES DE USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL.....	67
5.5	REDE DE DRENAGEM E RESOLUÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO	71
5.6	BLOCOS DE TIPO E USO DO SOLO	73
5.7	AJUSTE DO MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH	76
5.7.1	<i>Análise da Propagação de Vazões no Rio São Francisco.....</i>	<i>76</i>
5.7.2	<i>Calibração do modelo hidrológico.....</i>	<i>84</i>
5.7.3	<i>Verificação da calibração do modelo hidrológico</i>	<i>93</i>
5.8	RESUMO DO CAPÍTULO.....	101
6	PREVISÕES DE VAZÃO DE CURTO PRAZO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.....	103
6.1	PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO DE CURTO PRAZO DO MODELO ETA.....	103
6.2	AValiação DAS PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO ETA	104
6.3	PREVISÃO DE VAZÃO DE CURTO PRAZO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.....	110

6.3.1	<i>Resultados de previsão de vazão de curto prazo em Três Marias</i>	113
6.3.2	<i>Resultados de previsão de vazão de curto prazo em Sobradinho</i>	121
6.4	MODELO DE PREVISÃO DOS RESÍDUOS.....	127
6.4.1	<i>Previsão dos resíduos em Três Marias</i>	127
6.4.2	<i>Previsão dos resíduos em Sobradinho</i>	135
6.5	RESUMO DO CAPÍTULO.....	145
7	PREVISÕES CLIMÁTICAS DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	147
7.1	PREVISÕES CLIMÁTICAS DO MODELO GLOBAL CPTEC/INPE.....	147
7.1.1	<i>Correção dos erros sistemáticos na precipitação prevista</i>	148
7.1.2	<i>Avaliação das previsões corrigidas de precipitação</i>	151
7.1.3	<i>Redistribuição das precipitações diárias previstas</i>	155
7.2	PREVISÕES CLIMÁTICAS DO MODELO ETA (CPTEC/INPE).....	165
7.2.1	<i>Avaliação das Previsões Climáticas de Precipitação do Modelo ETA</i>	166
7.3	RESUMO DO CAPÍTULO.....	172
8	PREVISÕES DE VAZÃO DE LONGO PRAZO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	174
8.1	PREVISÕES DE VAZÃO BASEADAS NAS PREVISÕES CLIMÁTICAS DO MODELO AGCM DO CPTEC....	174
8.1.1	<i>Resultados em Três Marias</i>	176
8.1.2	<i>Resultados em Sobradinho</i>	187
8.2	PREVISÕES DE VAZÃO BASEADAS NAS PREVISÕES CLIMÁTICAS DO MODELO ETA DO CPTEC	196
8.2.1	<i>Resultados em Três Marias</i>	196
8.2.2	<i>Resultados em Sobradinho</i>	199
8.3	COMENTÁRIO SOBRE OS RESÍDUOS DA PREVISÃO DE LONGO PRAZO	201
8.4	RESUMO DO CAPÍTULO.....	202
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	203
9.1	CONCLUSÕES	204
9.2	RECOMENDAÇÕES.....	209
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	214
ANEXO A	APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	
ANEXO B	ESTRUTURA DO MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH / PARÂMETROS AJUSTADOS DO MODELO MGB-IPH	
ANEXO C	PARÂMETROS DO MODELO DE RESÍDUOS EM TRÊS MARIAS	
ANEXO D	PARÂMETROS DO MODELO DE RESÍDUOS EM SOBRADINHO	
ANEXO E	SÉRIE OBSERVADA DE SOI	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: SISTEMA GLOBAL DE OBSERVAÇÃO (GOS). COLETA, TRANSMISSÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS PARA SUPORTE À PREVISÃO DE TEMPO E CLIMA (WMO, 2005).	22
FIGURA 3.2: PRECISÃO DA PREVISÃO DE TEMPO EM RELAÇÃO AO PERÍODO DE ANTECEDÊNCIA, PARA O ECMWF E JMA (KIMURA, 2002).	23
FIGURA 3.3: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PADRÕES DE COMPORTAMENTO ATMOSFÉRICO SOBRE O OCEANO PACÍFICO, EM FUNÇÃO DA TSM (FONTE: SAMPAIO, 1999).	25
FIGURA 3.4: TÍPICOS PADRÕES DE CHUVA E TEMPERATURA ASSOCIADOS COM A OCORRÊNCIA DE EL NIÑO (FONTE: CPTEC, 2005A).	25
FIGURA 3.5: COMPONENTES DO SISTEMA CLIMÁTICO E INTERAÇÕES (ADAPTADO DE MCGUFFIE E HENDERSON-SELLERS, 1997).	30
FIGURA 3.6: DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DOS MODELO AGCM (ADAPTADO DE MCGUFFIE E HENDERSON-SELLER, 1997).	32
FIGURA 3.7: INTERAÇÕES ENTRE ATMOSFERA, OCEANOS E CONTINENTES, REPRESENTADAS PELOS MODELOS GLOBAIS (ADAPTADO DE KIMURA, 2002).	33
FIGURA 3.8: DETALHAMENTO DA RESOLUÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE “DOWNSCALING”.	35
FIGURA 3.9: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE PREVISÃO POR CONJUNTO (“ENSEMBLE”).	37
FIGURA 4.1: RESULTADOS HIPOTÉTICOS DE PREVISÃO DE VAZÃO, A PARTIR DE UM INSTANTE T ₀ , COM BASE NA CHUVA JÁ OCORRIDA OU COM BASE NA CHUVA JÁ OCORRIDA E NA CHUVA PREVISTA (COLLISCHONN ET AL, 2005).	42
FIGURA 4.2: ERROS SISTEMÁTICOS NA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MENSAL SIMULADA PELO MODELO GLOBAL DO CPTEC, PARA A CÉLULA CENTRADA NAS COORDENADAS 37,5° O e 10,26° S.	46
FIGURA 4.3: ESQUEMAS DA METODOLOGIA ATUALMENTE EMPREGADA NAS PREVISÕES DE VAZÃO DO ONS.	49
FIGURA 4.4: ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA PREVISÕES DE VAZÃO DE: (A) LONGO PRAZO; (B) CURTO PRAZO.	51
FIGURA 5.1: LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA BACIA DO SÃO FRANCISCO (CODEVASF, 2000).	57
FIGURA 5.2: REGIÕES FISIAGRÁFICAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO E LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS.	58
FIGURA 5.3: LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS HIDROMÉTRICOS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO: (A) POSTOS FLUVIOMÉTRICOS (TRIÂNGULOS SÃO USINAS HIDRELÉTRICAS); (B) POSTOS PLUVIOMÉTRICOS (AZUL - POSTOS DENTRO DA BACIA; VERMELHO - POSTOS FORA DA BACIA).	63
FIGURA 5.4: GRUPOS DE SOLOS CONSIDERADOS NA MODELAGEM DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.	67
FIGURA 5.5: ARTICULAÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE UTILIZADAS PARA A BACIA DO SÃO FRANCISCO.	69
FIGURA 5.6: MAPA DE ÁREAS IRRIGADAS (POLÍGONOS AMARELOS) SOBREPOSTO À IMAGEM DE SATÉLITE NA REGIÃO DE JUAZEIRO (BA) E PETROLINA (PE).	70

FIGURA 5.7: GRUPOS DE USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL NA BACIA DO SÃO FRANCISCO	71
FIGURA 5.8: DISCRETIZAÇÃO E REDE DE DRENAGEM OBTIDA PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO E SUB-BACIAS SELECIONADAS PARA AJUSTE DO MODELO HIDROLÓGICO.	74
FIGURA 5.9: BLOCOS DO MODELO PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO, RESULTANTES DA COMBINAÇÃO DAS CLASSES DE TIPOS E USO DO SOLO.	75
FIGURA 5.10: HIDROGRAMAS DE VAZÕES NO RIO SÃO FRANCISCO: A) E B) ATÉ A USINA DE TRÊS MARIAS; C) E D) ENTRE TRÊS MARIAS E O POSTO FLUVIOMÉTRICO SÃO FRANCISCO:.....	77
FIGURA 5.11: HIDROGRAMAS DAS CHEIAS ENTRE O POSTO SÃO FRANCISCO E SOBRADINHO: A) VERÃO DE 1987/1988; VERÃO DE 1978/1979.	79
FIGURA 5.12: HIDROGRAMAS DE VAZÕES DO RIO SÃO FRANCISCO DESTACANDO A INCONSISTÊNCIA DOS PERÍODOS ÚMIDOS, ENTRE OS POSTOS BOM JESUS DA LAPA E MORPARÁ: A) ABRIL/88 A SETEMBRO/89; B) ABRIL/98 A SETEMBRO/99.	80
FIGURA 5.13: HIDROGRAMAS DE VAZÕES AFLUENTES A USINA DE SOBRADINHO: A) ABRIL/82 A SETEMBRO/84; B) ABRIL/96 A SETEMBRO/99.	82
FIGURA 5.14: PERDAS DE VAZÃO NO RIO SÃO FRANCISCO, NO TRECHO ENTRE BOM JESUS DA LAPA E A USINA DE SOBRADINHO.	83
FIGURA 5.15: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO DO RIO SÃO FRANCISCO NOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS (A) PORTO ANDORINHA E (B) PORTO DA TAQUARA, DE SETEMBRO DE 1982 A SETEMBRO DE 1985.	88
FIGURA 5.16: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO DO RIO SÃO FRANCISCO NA UHE TRÊS MARIAS, DE DEZEMBRO DE 1980 A SETEMBRO DE 1987.	89
FIGURA 5.17: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO DO RIO SÃO FRANCISCO NA UHE TRÊS MARIAS, DE OUTUBRO DE 1984 A MAIO DE 1986.	89
FIGURA 5.18: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO: (A) RIO SÃO FRANCISCO NO POSTO FLUVIOMÉTRICO PIRAPORA-BARREIRO; (B) RIO PARACATU EM PORTO ALEGRE.	90
FIGURA 5.19: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO DO RIO SÃO FRANCISCO NO POSTO FLUVIOMÉTRICO SÃO FRANCISCO, PERÍODO DE SETEMBRO DE 1978 A SETEMBRO DE 1983.	91
FIGURA 5.20: HIDROGRAMAS OBSERVADO E CALCULADO NO RIO SÃO FRANCISCO EM MORPARÁ, DE SETEMBRO DE 1978 A OUTUBRO DE 1987.	92
FIGURA 5.21: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO DO RIO SÃO FRANCISCO AFLUENTES AO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO, DE JANEIRO DE 1978 A SETEMBRO DE 1987.	92
FIGURA 5.22: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO DO RIO SÃO FRANCISCO AFLUENTES AO RESERVATÓRIO DA USINA TRÊS MARIAS, DE OUTUBRO DE 1987 A OUTUBRO DE 1997 (PERÍODO DE VERIFICAÇÃO).	95
FIGURA 5.23: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO NO PERÍODO DE SETEMBRO DE 1990 A SETEMBRO DE 1997 (PERÍODO DE VERIFICAÇÃO): (A) RIO DAS VELHAS EM VÁRZEA DA PALMA E (B) RIO PARACATU EM PORTO ALEGRE.	96
FIGURA 5.24: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO DO RIO SÃO FRANCISCO DE SETEMBRO DE 1987 A SETEMBRO DE 1997: (A) POSTO BOM JESUS DA LAPA E (B) POSTO DE MORPARÁ.	96
FIGURA 5.25: HIDROGRAMAS CALCULADO E OBSERVADO DO RIO SÃO FRANCISCO AFLUENTES AO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO, DE SETEMBRO DE 1987 A SETEMBRO DE 1997.	97
FIGURA 5.26: DIFERENÇAS ENTRE VAZÕES CALCULADAS E OBSERVADAS NO RIO SÃO FRANCISCO NO POSTO MORPARÁ E NA USINA DE SOBRADINHO.	98

FIGURA 5.27: HIDROGRAMAS CALCULADOS E OBSERVADOS NO RIO SÃO FRANCISCO APÓS A INCLUSÃO DE PERDAS CONSTANTES POR USOS CONSUNTIVOS E VALORES NÃO EXPLICADOS: (A) E (B) MORPARÁ E SOBRADINHO RESPECTIVAMENTE, NO PERÍODO DE VERIFICAÇÃO; (C) E (D) DETALHE DA CHEIA DE 1992 EM MORPARÁ E SOBRADINHO, RESPECTIVAMENTE.....	99
FIGURA 5.28: HIDROGRAMAS DE VAZÕES NATURAIS CALCULADAS E OBSERVADAS DO RIO SÃO FRANCISCO NA USINA DE SOBRADINHO, PERÍODO DE SETEMBRO DE 1987 A DEZEMBRO DE 1996.	101
FIGURA 6.1: PONTOS DE GRADE DO MODELO ETA DE RESOLUÇÃO 0,4 GRAUS, SOBRE OS LIMITES DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.	103
FIGURA 6.2: PRECIPITAÇÃO PREVISTA PELO MODELO ETA (A) E OBSERVADA (B) INTERPOLADA PARA A GRADE DO MODELO HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO (PREVISÃO PARA O DIA 08/11/2000 REALIZADA NO DIA 07/11/2000).....	105
FIGURA 6.3: REGIÕES ANALISADAS QUANTO ÀS PREVISÕES DE CHUVA DOS MODELO ATMOSFÉRICOS: A) BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ TRÊS MARIAS; B) BACIA DO RIO PARACATU ATÉ PORTO ALEGRE; C) BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ SÃO FRANCISCO; D) BACIA DO RIO GRANDE ATÉ BOQUEIRÃO; E) BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ SOBRADINHO; F) BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ A FOZ.....	106
FIGURA 6.4: COMPARAÇÃO ENTRE AS CHUVAS PREVISTAS PELO MODELO ETA E OBSERVADAS. VALORES MÉDIOS PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ (A) TRÊS MARIAS E ATÉ (B) SOBRADINHO, COM 1 DIA DE ANTECEDÊNCIA. PERÍODO DE JULHO DE 1996 A JULHO DE 1998.	106
FIGURA 6.5: CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS PELO MODELO ETA NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO (A) ATÉ TRÊS MARIAS E (B) ATÉ SOBRADINHO, COM 1 DIA DE ANTECEDÊNCIA.	107
FIGURA 6.6: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS CHUVAS PREVISTAS E OBSERVADAS MÉDIAS PARA AS DIFERENTES SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.	108
FIGURA 6.7: COMPARAÇÃO ENTRE AS CHUVAS PREVISTAS PELO MODELO ETA E OBSERVADAS. VALORES ACUMULADOS DOS 7 PRIMEIROS DIAS DA PREVISÃO, MÉDIOS PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ TRÊS MARIAS.	108
FIGURA 6.8: CORRELAÇÕES ENTRE CHUVAS ACUMULADAS OBSERVADAS E PREVISTAS PARA HORIZONTES DE 3 E 7 DIAS NAS BACIAS DE TRÊS MARIAS, RIO GRANDE E SOBRADINHO (A LINHA AZUL INDICA A PREVISÃO PERFEITA).	110
FIGURA 6.9: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS CHUVAS ACUMULADAS OBSERVADAS E PREVISTAS PARA DIFERENTES HORIZONTES DE PREVISÃO E DIFERENTES SUB-BACIAS. ...	111
FIGURA 6.10: EXEMPLO DO PREVISÃO DE VAZÃO NATURAL EM TRÊS MARIAS COM HORIZONTE DE 14 DIAS, COM INÍCIO NO DIA 12/12/2001 E FINAL NO DIA 25/12/2001 (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA AZUL: VAZÃO PREVISTA CONSIDERANDO CHUVA ZERO; LINHA VERMELHA: VAZÃO PREVISTA COM BASE NA CHUVA OBSERVADA; LINHA VERDE: VAZÃO PREVISTA COM BASE NA CHUVA PREVISTA PELO MODELO ETA – 10 DIAS).	112
FIGURA 6.11: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM UMA SEMANA DE ANTECEDÊNCIA PARA TRÊS MARIAS (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA VERMELHA: PREVISÃO DE VAZÃO BASEADA NA CHUVA OBSERVADA).....	114
FIGURA 6.12: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM UMA SEMANA DE ANTECEDÊNCIA PARA TRÊS MARIAS NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003 (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA VERMELHA: PREVISÃO DE VAZÃO BASEADA NA CHUVA OBSERVADA).	115

FIGURA 6.13: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM UMA SEMANA DE ANTECEDÊNCIA PARA TRÊS MARIAS, COM DETALHE PARA O DESEMPENHO DO MODELO NAS FORTES SUBIDAS DO HIDROGRAMAS NOS MESES DE DEZEMBRO DE 2001 E 2002.	116
FIGURA 6.14: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM DUAS SEMANAS DE ANTECEDÊNCIA PARA TRÊS MARIAS NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003 (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA VERMELHA: PREVISÃO DE VAZÃO BASEADA NA CHUVA OBSERVADA).	117
FIGURA 6.15: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM DUAS SEMANAS DE ANTECEDÊNCIA PARA TRÊS MARIAS, COM DETALHE PARA O DESEMPENHO DO MODELO NAS FORTES SUBIDAS DO HIDROGRAMAS NOS MESES DE DEZEMBRO DE 2001 E 2002.	118
FIGURA 6.16: MÉDIAS DOS ERROS ABSOLUTOS DAS PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL EM TRÊS MARIAS, NAS ANTECEDÊNCIAS DE UMA A QUATRO SEMANAS: (A) ERRO MÉDIO (<i>EM</i>); (B) ERRO MÉDIO ABSOLUTO (<i>EMA</i>); (C) ERRO MÉDIO RELATIVO (<i>EMR</i>); (D) COEFICIENTE DE PERSISTÊNCIA (<i>RD</i>).	119
FIGURA 6.17: CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA COM BASE NAS PREVISÕES DO MODELO ETA PARA TRÊS MARIAS, NAS ANTECEDÊNCIAS DE UMA E DUAS SEMANAS. ...	121
FIGURA 6.18: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM UMA SEMANA DE ANTECEDÊNCIA PARA SOBRADINHO (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA VERMELHA: PREVISÃO DE VAZÃO BASEADA NA CHUVA OBSERVADA).	122
FIGURA 6.19: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM 1 SEMANA DE ANTECEDÊNCIA PARA SOBRADINHO NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003 (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA VERMELHA: PREVISÃO DE VAZÃO BASEADA NA CHUVA OBSERVADA).	123
FIGURA 6.20: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM DUAS SEMANAS DE ANTECEDÊNCIA PARA SOBRADINHO NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003 (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA VERMELHA: PREVISÃO DE VAZÃO BASEADA NA CHUVA OBSERVADA).	124
FIGURA 6.21: MÉDIAS DOS ERROS ABSOLUTOS DAS PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL EM SOBRADINHO, NAS ANTECEDÊNCIAS DE UMA A QUATRO SEMANAS: (A) ERRO MÉDIO (<i>EM</i>); (B) ERRO MÉDIO ABSOLUTO (<i>EMA</i>); (C) ERRO MÉDIO RELATIVO (<i>EMR</i>); (D) COEFICIENTE DE PERSISTÊNCIA (<i>RD</i>).	126
FIGURA 6.22: CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO OBSERVADA E PREVISTA COM BASE NAS PREVISÕES DO MODELO ETA PARA TRÊS MARIAS, NAS ANTECEDÊNCIAS DE UMA E DUAS SEMANAS. ...	127
FIGURA 6.23: RESÍDUOS DAS PREVISÕES DE VAZÃO DO MODELO MGB COM CHUVA PREVISTA PELO ETA EM TRÊS MARIAS, PARA ANTECEDÊNCIAS DE UMA E DUAS SEMANAS.	128
FIGURA 6.24: CORRELOGRAMAS DOS RESÍDUOS DAS PREVISÕES DE VAZÃO EM TRÊS MARIAS PARA AS PRIMEIRAS 156 SEMANAS E ANTECEDÊNCIAS DE UMA E DUAS SEMANAS.	129
FIGURA 6.25: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM 1 SEMANA DE ANTECEDÊNCIA PARA TRÊS MARIAS NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003 (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA MAGENTA: PREVISÃO DE VAZÃO CORRIGIDAS PELO MODELO DE PREVISÃO DOS RESÍDUOS).	133
FIGURA 6.26: ERROS MÉDIOS ABSOLUTOS (A) E RELATIVOS (B) DAS PREVISÕES EM TRÊS MARIAS, NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003. PREVISÕES USANDO CHUVA OBSERVADA (VERMELHO), CHUVA PREVISTA PELO ETA (VERDE) E PREVISÕES CORRIGIDAS COM O MODELO DOS RESÍDUOS (AZUL).	134

FIGURA 6.27: ERROS MÉDIOS ABSOLUTOS (A) E RELATIVOS (B) DAS PREVISÕES EM TRÊS MARIAS, NO PERÍODO DE OUTUBRO DE 2002 A DEZEMBRO DE 2003. PREVISÕES USANDO CHUVA OBSERVADA (VERMELHO), COM CHUVA PREVISTA PELO ETA (VERDE) E PREVISÕES CORRIGIDAS COM O MODELO DOS RESÍDUOS (AZUL).	135
FIGURA 6.28: RESÍDUOS DAS PREVISÕES DE VAZÃO DO MODELO MGB COM CHUVA PREVISTA PELO ETA EM SOBRADINHO, PARA ANTECEDÊNCIAS DE UMA E DUAS SEMANAS.	136
FIGURA 6.29: CORRELOGRAMAS DOS RESÍDUOS DAS PREVISÕES DE VAZÃO EM SOBRADINHO NAS ANTECEDÊNCIAS DE 1 E 2 SEMANAS: (A,B) PRIMEIRAS 156 SEMANAS DO PERÍODO 1996 A 2000; (C,D) PRIMEIRAS 52 SEMANAS DO PERÍODO 2001 A 2003.	137
FIGURA 6.30: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM 1 SEMANA DE ANTECEDÊNCIA PARA SOBRADINHO NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003 (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA MAGENTA: PREVISÃO DE VAZÃO CORRIGIDAS PELO MODELO DE PREVISÃO DOS RESÍDUOS).	140
FIGURA 6.31: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM 2 SEMANAS DE ANTECEDÊNCIA PARA SOBRADINHO NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003 (LINHA PRETA: VAZÃO NATURAL OBSERVADA; LINHA VERDE: PREVISÕES BASEADAS NA PREVISÃO DE CHUVA DO MODELO ETA; LINHA MAGENTA: PREVISÃO DE VAZÃO CORRIGIDAS PELO MODELO DE PREVISÃO DOS RESÍDUOS).	141
FIGURA 6.32: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM 1 SEMANA DE ANTECEDÊNCIA PARA SOBRADINHO NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003: A LINHA VERDE INDICA AS PREVISÕES DOS MODELOS ETA/MGB SEM AS RETIRADAS CONSTANTES DE 250M ³ /S EM MORPARÁ E SOBRADINHO; A LINHA MAGENTA É ESSA PREVISÃO CORRIGIDA PELO MODELO DOS RESÍDUOS.	142
FIGURA 6.33: PREVISÕES DE VAZÃO SEMANAL COM 2 SEMANAS DE ANTECEDÊNCIA PARA SOBRADINHO NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1996 A DEZEMBRO DE 2003: A LINHA VERDE INDICA AS PREVISÕES DOS MODELOS ETA/MGB SEM AS RETIRADAS CONSTANTES DE 250M ³ /S EM MORPARÁ E SOBRADINHO; A LINHA MAGENTA É ESSA PREVISÃO CORRIGIDA PELO MODELO DOS RESÍDUOS.	143
FIGURA 6.34: ERROS MÉDIOS ABSOLUTOS (A) E RELATIVOS (B) DAS PREVISÕES DE VAZÃO CORRIGIDAS EM SOBRADINHO: EM VERDE SÃO PREVISÕES REALIZADAS COM RETIRADAS CONSTANTES DE 250 M ³ /S NO MODELO MGB E EM LARANJA SÃO PREVISÕES SEM AS RETIRADAS.	143
FIGURA 6.35: ERROS MÉDIOS ABSOLUTOS (A) E RELATIVOS (B) DAS PREVISÕES EM SOBRADINHO, NO PERÍODO DE OUTUBRO DE 2002 A DEZEMBRO DE 2003. PREVISÕES USANDO CHUVA OBSERVADA (VERDE), COM CHUVA PREVISTA PELO ETA (VERMELHO) E PREVISÕES CORRIGIDAS COM O MODELO DOS RESÍDUOS (LARANJA).	144
FIGURA 7.1: RESOLUÇÃO ESPACIAL DO MODELO GLOBAL DO CPTEC E O CONTORNO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.	148
FIGURA 7.2: ERROS SISTEMÁTICOS NA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MENSAL SIMULADA PELO MODELO GLOBAL DO CPTEC, PARA A CÉLULA CENTRADA NAS COORDENADAS 37,5°W E 10,26°S.	149
FIGURA 7.3: CORREÇÃO NOS VALORES DE PRECIPITAÇÃO PREVISTA COM BASE NAS CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE ACUMULADA. CÉLULA CENTRADA NAS COORDENADAS 37,5° O E 10,26° S, CURVAS VÁLIDAS PARA O MÊS DE ABRIL. SÉRIES DE 1970 A 1996. ...	150
FIGURA 7.4: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS CHUVAS MÉDIAS PREVISTAS PELO MODELO GLOBAL E AS OBSERVADAS PARA AS DIFERENTES SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.	152

FIGURA 7.5: COMPARAÇÃO ENTRE AS CHUVAS PREVISTAS PELO MODELO GLOBAL DO CPTEC E VALORES OBSERVADOS. VALORES MÉDIOS PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ TRÊS MARIAS (A, B) E SOBRADINHO (C, D).....	153
FIGURA 7.6: CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS PELO MODELO GLOBAL DO CPTEC NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO: (A,B) ATÉ TRÊS MARIAS E (C,D) ATÉ SOBRADINHO, COM 1 E 6 MESES DE ANTECEDÊNCIA.	154
FIGURA 7.7: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS CHUVAS ACUMULADAS OBSERVADAS E PREVISTAS PELO MODELO GLOBAL PARA DIFERENTES HORIZONTES DE PREVISÃO E DIFERENTES SUB-BACIAS.	155
FIGURA 7.8: COMPARAÇÃO ENTRE AS CHUVAS PREVISTAS PELO MODELO GLOBAL DO CPTEC (MÉDIA DOS 5 MEMBROS) E OBSERVADAS: VALORES ACUMULADOS NOS 3 E 6 PRIMEIROS MESES DA PREVISÃO, MÉDIOS PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ (A,B) TRÊS MARIAS E (C,D) SOBRADINHO.....	156
FIGURA 7.9: DISTRIBUIÇÃO DE CHUVA DIÁRIA OBSERVADA E PREVISTA EM UMA CÉLULA DO MODELO GLOBAL DO CPTEC SOBRE A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO. PREVISÃO DE 2 MEMBROS COM ALCANCE DE 6 MESES A FRENTE.	157
FIGURA 7.10: CURVAS DE PERMANÊNCIA E DE CHUVA ACUMULADA EM VALORES ADIMENSIONAIS (CHUVA DIÁRIA/TOTAL SEMESTRAL), PARA CÉLULAS DO MODELO GLOBAL LOCALIZADAS NAS REGIÕES: (A,B) BAIXO SÃO FRANCISCO; (C,D) MÉDIO SÃO FRANCISCO; (E,F) ALTO SÃO FRANCISCO. VALORES REFERENTES A PREVISÃO DE SETEMBRO DE 1998, OU SEJA, PARA O PERÍODO DE 1/10/1998 A 31/3/1999.	159
FIGURA 7.11: (A) PRECIPITAÇÃO PREVISTA PELO MODELO GLOBAL DO CPTEC E (B) OBSERVADA INTERPOLADA PARA A GRADE DO MODELO HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO (PREVISÃO PARA O MÊS 03/2002 REALIZADA NO MÊS 02/2002).....	160
FIGURA 7.12: CONJUNTOS DE PRECIPITAÇÃO SEMESTRAL PREVISTA PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ SOBRADINHO, SELECIONADOS DO HISTÓRICO COM BASE EM: (A) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AGCM; (B) ITEM (A) E FASES DO SOI.	163
FIGURA 7.13: CORRELAÇÕES ENTRE PRECIPITAÇÃO PREVISTA E OBSERVADA, COMPARANDO-SE AS PREVISÕES ORIGINAIS DO MODELO AGCM E OS VALORES REDISTRIBUÍDOS, PARA AS ÁREAS ATÉ TRÊS MARIAS E SOBRADINHO: (A,B) VALORES MÊS A MÊS; (C,D) VALORES ACUMULADOS DE 1 A 6 MESES.	164
FIGURA 7.14: VALORES DE RMSE DA CHUVA PREVISTA SOBRE A BACIA ATÉ SOBRADINHO, COMPARANDO-SE AS PREVISÕES ORIGINAIS DO MODELO AGCM E OS VALORES REDISTRIBUÍDOS: (A) VALORES MÊS A MÊS; (B) VALORES ACUMULADOS DE 1 A 6 MESES.	165
FIGURA 7.15: PRECIPITAÇÃO PREVISTA PELO MODELO ETA (A) E OBSERVADA (B) INTERPOLADA PARA A GRADE DO MODELO HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO (PREVISÃO PARA O MÊS 01/1999 REALIZADA NO MÊS 12/1998).....	167
FIGURA 7.16: COMPARAÇÃO ENTRE AS CHUVAS PREVISTAS PELOS MODELOS ETA E VALORES OBSERVADOS. VALORES MÉDIOS DE CHUVA PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ A USINA DE TRÊS MARIAS. PREVISÕES COM ANTECEDÊNCIA CONSTANTE DE 1 MÊS E 3 MESES.	168
FIGURA 7.17: CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS PELOS MODELOS ETA NA BACIA CONTRIBUINTE ATÉ TRÊS MARIAS, COM ANTECEDÊNCIA DE 1 E 3 MESES.....	169
FIGURA 7.18: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS CHUVAS MÉDIAS PREVISTAS PELO MODELO ETA E OS VALORES OBSERVADOS PARA AS DIFERENTES SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.	170

FIGURA 7.19: COMPARAÇÃO ENTRE AS CHUVAS PREVISTAS PELO MODELO ETA (MÉDIA DE 5 MEMBROS) E VALORES OBSERVADOS. VALORES ACUMULADOS DOS 3 PRIMEIROS MESES DE CADA PREVISÃO, MÉDIOS PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ TRÊS MARIAS E SOBRADINHO.....	171
FIGURA 7.20: CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS OBSERVADAS E PREVISTAS PELO MODELO ETA NA BACIA CONTRIBUINTE ATÉ A USINA DE TRÊS MARIAS. VALORES DE TOTAIS ACUMULADOS DE 3 MESES.....	171
FIGURA 7.21: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS CHUVAS PREVISTAS PELO MODELO ETA E AS OBSERVADAS PARA AS DIFERENTES SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO, EM VALORES ACUMULADOS PARA DIFERENTES HORIZONTES.	172
FIGURA 8.1: EXEMPLO DE PREVISÃO DE VAZÃO NATURAL EM SOBRADINHO COM HORIZONTE DE 6 MESES, INICIADA NO DIA 1 DE OUTUBRO DE 1998 E ESTENDENDO-SE ATÉ O DIA 31 DE MARÇO DE 1999. AS LINHAS COLORIDAS APRESENTAM AS PREVISÕES OBTIDAS COM CADA UM DOS 5 MEMBROS DO MODELO GLOBAL E A LINHA PRETA APRESENTA AS VAZÕES OBSERVADAS.....	175
FIGURA 8.2: EXEMPLO DE PREVISÃO (MÉDIA DO CONJUNTO DE 5 MEMBROS) COM HORIZONTE DE 6 MESES, INICIADA NO DIA 1 DE OUTUBRO DE 1997 E ESTENDENDO-SE ATÉ O DIA 31 DE MARÇO DE 1998.	176
FIGURA 8.3: HIDROGRAMAS DE PREVISÃO DE VAZÃO MENSAL COM ANTECEDÊNCIA CONSTANTE DE (A) 1 MÊS E DE (B) 6 MESES.	177
FIGURA 8.4: COMPARAÇÃO DA ÁREA DE DRENAGEM DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ TRÊS MARIAS E DA RESOLUÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO GLOBAL.....	178
FIGURA 8.5: PREVISÃO DE VAZÕES PARA A USINA DE TRÊS MARIAS UTILIZANDO CHUVA OBSERVADA, COM ANTECEDÊNCIAS DE 1 E 6 MESES.	178
FIGURA 8.6: PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM TRÊS MARIAS PARA ANTECEDÊNCIAS CONSTANTES DE 1 A 6 MESES. A LINHA AZUL É A VAZÃO NATURAL OBSERVADA; A FAIXA CINZA REPRESENTA OS VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS PREVISTOS COM BASE NOS 5 MEMBROS DO MODELO AGCM E A LINHA PRETA MAIS GROSSA É A MÉDIA DOS 5 MEMBROS.....	180
FIGURA 8.7: PREVISÕES DE VAZÕES NATURAIS (A) TRIMESTRAIS E (B) SEMESTRAIS EM TRÊS MARIAS. A LINHA AZUL É A VAZÃO NATURAL OBSERVADA; A FAIXA CINZA REPRESENTA OS VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS PREVISTOS COM BASE NOS 5 MEMBROS DO MODELO AGCM E A LINHA PRETA MAIS GROSSA É A MÉDIA DOS 5 MEMBROS.	181
FIGURA 8.8: PREVISÕES DE VAZÃO PARA TRÊS MARIAS COM BASE NA PREVISÃO DO MODELO AGCM SEM E COM REDISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DIÁRIOS, PARA 1 E 6 MESES DE ANTECEDÊNCIA.	182
FIGURA 8.9: PREVISÕES DE VAZÃO PARA TRÊS MARIAS COM BASE NA PREVISÃO DO MODELO AGCM SEM E COM REDISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DIÁRIOS. VALORES MÉDIOS TRIMESTRAIS E SEMESTRAIS.	183
FIGURA 8.10: PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM TRÊS MARIAS COM DE ANTECEDÊNCIAS DE 1 A 6 MESES. A LINHA AZUL É A VAZÃO NATURAL OBSERVADA; A LINHA VERDE É A VAZÃO PREVISTA COM BASE NO MODELO GLOBAL REDISTRIBUÍDA COM AS FASES DO SOI; A LINHA LARANJA É A PREVISÃO DO MODELO PREVIVAZM; A LINHA TRACEJADA É A VAZÃO NATURAL MÉDIA DE LONGO TERMO.	185
FIGURA 8.11: <i>RMSE</i> E REDUÇÃO DA VARIÂNCIA (<i>RV</i>), EM RELAÇÃO A <i>MLT</i> , DAS PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM TRÊS MARIAS, ANTECEDÊNCIAS DE 1 A 6 MESES (VERDE: VAZÃO PREVISTA COM BASE NO MODELO AGCM; LARANJA: PREVISÃO DO MODELO PREVIVAZM; AZUL: PREVISÃO BASEADA NA VAZÃO NATURAL MÉDIA DE LONGO TERMO; VERMELHO: PREVISÃO DE VAZÃO BASEADA NA CHUVA OBSERVADA).	186

FIGURA 8.12: COMPARAÇÃO DA ÁREA DE DRENAGEM DO RIO SÃO FRANCISCO ATÉ SOBRADINHO E DA RESOLUÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO GLOBAL.....	187
FIGURA 8.13: PREVISÃO DE VAZÕES PARA A USINA DE SOBRADINHO UTILIZANDO CHUVA OBSERVADA, COM ANTECEDÊNCIAS DE 1 E 6 MESES.	188
FIGURA 8.14: PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM SOBRADINHO PARA ANTECEDÊNCIAS CONSTANTES DE 1 A 6 MESES. A LINHA AZUL É A VAZÃO NATURAL OBSERVADA; A FAIXA CINZA REPRESENTA OS VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS PREVISTOS COM BASE NOS 5 MEMBROS DO MODELO AGCM E A LINHA PRETA MAIS GROSSA É A MÉDIA DOS 5 MEMBROS.....	189
FIGURA 8.15: PREVISÕES DE VAZÕES NATURAIS (A) TRIMESTRAIS E (B) SEMESTRAIS EM SOBRADINHO. A LINHA AZUL É A VAZÃO NATURAL OBSERVADA; A FAIXA CINZA REPRESENTA OS VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS PREVISTOS COM BASE NOS 5 MEMBROS DO MODELO AGCM E A LINHA PRETA MAIS GROSSA É A MÉDIA DOS 5 MEMBROS.	191
FIGURA 8.16: PREVISÕES DE VAZÃO PARA SOBRADINHO COM BASE NA PREVISÃO DO MODELO AGCM SEM E COM REDISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DIÁRIOS, PARA 1 E 6 MESES DE ANTECEDÊNCIA.	192
FIGURA 8.17: PREVISÕES DE VAZÃO PARA SOBRADINHO COM BASE NA PREVISÃO DO MODELO AGCM SEM E COM REDISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DIÁRIOS. VALORES MÉDIOS TRIMESTRAIS E SEMESTRAIS.	192
FIGURA 8.18: PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM SOBRADINHO COM DE ANTECEDÊNCIAS DE 1 A 6 MESES. A LINHA AZUL É A VAZÃO NATURAL OBSERVADA; A LINHA VERDE É A VAZÃO PREVISTA COM BASE NO MODELO AGCM REDISTRIBUÍDA COM AS FASES DO SOI; A LINHA LARANJA É A PREVISÃO DO MODELO PREVIVAZM; A LINHA TRACEJADA É A VAZÃO NATURAL MÉDIA DE LONGO TERMO.....	194
FIGURA 8.19: <i>RMSE</i> DAS PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM SOBRADINHO: (A) PREVISÕES MENSIS COM ANTECEDÊNCIAS DE 1 A 6 MESES; (B) PREVISÕES DE VAZÕES MÉDIAS DE MENSIS, BIMESTRAIS, ..., SEMESTRAIS (VERDE: VAZÃO PREVISTA COM BASE NO MODELO AGCM; LARANJA: PREVISÃO DO MODELO PREVIVAZM; AZUL: PREVISÃO BASEADA NA VAZÃO NATURAL MÉDIA DE LONGO TERMO; VERMELHO: PREVISÃO DE VAZÃO BASEADA NA CHUVA OBSERVADA).....	195
FIGURA 8.20: (A) ERRO RELATIVO MÉDIO E (B) RV, EM RELAÇÃO A MLT, DAS PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM SOBRADINHO, COM ANTECEDÊNCIAS DE 1 A 6 MESES.	195
FIGURA 8.21: PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM TRÊS MARIAS COM DE ANTECEDÊNCIAS DE 1 A 6 MESES. A LINHA AZUL É A VAZÃO NATURAL OBSERVADA; A LINHA VERDE É A VAZÃO PREVISTA COM BASE NO MODELO ETA; A LINHA LARANJA É A PREVISÃO DO MODELO PREVIVAZM; A LINHA TRACEJADA É A VAZÃO NATURAL MÉDIA DE LONGO TERMO. ...	197
FIGURA 8.22: <i>EMR</i> E <i>RMSE</i> DAS PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM TRÊS MARIAS, DE 1 A 6 MESES DE ANTECEDÊNCIA, COM BASE NO MODELO ETA.	198
FIGURA 8.23: PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM SOBRADINHO COM DE ANTECEDÊNCIAS DE 1 A 6 MESES. A LINHA AZUL É A VAZÃO NATURAL OBSERVADA; A LINHA VERDE É A VAZÃO PREVISTA COM BASE NO MODELO ETA; A LINHA LARANJA É A PREVISÃO DO MODELO PREVIVAZM; A LINHA TRACEJADA É A VAZÃO NATURAL MÉDIA DE LONGO TERMO. ...	200
FIGURA 8.24 <i>EMR</i> E <i>RMSE</i> DAS PREVISÕES DE VAZÃO NATURAL EM SOBRADINHO, DE 1 A 6 MESES DE ANTECEDÊNCIA, COM BASE NO MODELO ETA.	201
FIGURA 9.1: AUMENTO DE BENEFÍCIO ENTRE PREVISÃO PERFEITA E A AUSÊNCIA DE PREVISÃO DE VAZÕES. ESTIMATIVAS PARA AS USINAS TRÊS MARIAS E SOBRADINHO. (ADAPTADO DE MAURER, 2002).....	213

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1: ÁREA OCUPADA PELOS PRINCIPAIS GRUPOS DE SOLOS NA BACIA DO SÃO FRANCISCO	66
TABELA 5.2: PORCENTAGEM DE ÁREA OCUPADA PELOS PRINCIPAIS CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA DO SÃO FRANCISCO	70
TABELA 5.3: SUB-BACIAS CONSIDERADAS PARA A CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO, NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.	73
TABELA 5.4: BLOCOS DE TIPOS DE SOLOS E USOS DO SOLO DA BACIA DO SÃO FRANCISCO, CONSIDERADOS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	75
TABELA 5.5: VALORES DAS FUNÇÕES OBJETIVO OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO MGB-IPH PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO NO PERÍODO DE 1/1/1977 A 31/12/1987.....	87
TABELA 5.6: VALORES DAS FUNÇÕES OBJETIVO DE VAZÕES DIÁRIAS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO, DURANTE O PERÍODO DE VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH	94
TABELA 5.7: VALORES DAS FUNÇÕES OBJETIVO EM MORPARÁ E SOBRADINHO, ANTES E APÓS A INTRODUÇÃO DE PERDAS CONSTANTES NO MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH	100
TABELA 5.8: VALORES DAS FUNÇÕES OBJETIVO EM TRÊS MARIAS E SOBRADINHO, COMPARANDO AS VAZÕES CALCULADAS COM AS AFLUENTES E AS NATURAIS.	100
TABELA 6.1: ERROS MÉDIOS DAS PREVISÕES DE CHUVA ACUMULADA DE 10 DIAS MÉDIAS NAS DIFERENTES SUB-BACIAS DO RIO SÃO FRANCISCO.....	111
TABELA 6.2: ESTATÍSTICAS DOS RESÍDUOS DA PREVISÃO DE VAZÕES EM TRÊS MARIAS	128
TABELA 6.3: RESULTADOS DO AJUSTE DOS MODELOS DE PREVISÃO DOS RESÍDUOS EM TRÊS MARIAS, PARA UMA SEMANA DE ANTECEDÊNCIA.	131
TABELA 6.4: RESULTADOS DO AJUSTE DOS MODELOS DE PREVISÃO DOS RESÍDUOS EM TRÊS MARIAS, PARA DUAS SEMANAS DE ANTECEDÊNCIA. OBS.: OS TERMOS DO LADO DIREITO $E(t-1)$ E $WCI(t-1)$ DAS EQUAÇÕES DOS MODELOS SÃO ALTERADOS PARA $E(t-2)$ E $WCI(t-2)$	131
TABELA 6.5: ERROS MÉDIOS DAS PREVISÕES DE VAZÃO CORRIGIDAS EM TRÊS MARIAS, PARA O PERÍODO TOTAL DE 413 SEMANAS E OS CRITÉRIOS DE ATUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS COM JANELA CONSTANTE DE 156 SEMANAS E JANELA CRESCENTE.	132
TABELA 6.6: ESTATÍSTICAS DOS RESÍDUOS DA PREVISÃO DE VAZÕES EM SOBRADINHO	136
TABELA 6.7: RESULTADOS DO AJUSTE DOS MODELOS DE PREVISÃO DOS RESÍDUOS EM SOBRADINHO, PARA UMA SEMANA DE ANTECEDÊNCIA.	138
TABELA 6.8: RESULTADOS DO AJUSTE DOS MODELOS DE PREVISÃO DOS RESÍDUOS EM SOBRADINHO, PARA DUAS SEMANAS DE ANTECEDÊNCIA. OBS.: OS TERMOS DO LADO DIREITO $E(t-1)$ E $WCI(t-1)$ DAS EQUAÇÕES DOS MODELOS SÃO ALTERADOS PARA $E(t-2)$ E $WCI(t-2)$	139
TABELA 7.1: PERÍODOS DE PREVISÃO DO MODELO ETA.....	166
TABELA 9.1: ESTIMATIVA DO INCREMENTO DE BENEFÍCIO NOS RESERVATÓRIOS DE TRÊS MARIAS E SOBRADINHO	213

LISTA DE SIMBOLOS

ξ	Número aleatório
ΔV	Erro relativo de volume
a_1, a_2, \dots	parâmetros do modelo de resíduos
b_1, b_2, \dots	parâmetros do modelo de resíduos
AGCM	Modelo de circulação geral atmosférico
ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARPEGE	Action Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ARPS	Advanced Regional Prediction System
BOLAM	Modelo atmosférico regional
CCA	Correlação canônica
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CPINS	Modelo de previsão de vazões incrementais em Sobradinho
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DEMETER	Development of a European Multimodel Ensemble System for Seasonal-to-Interannual Prediction
E	Resíduo da previsão hidroclimática
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
EM	Erro médio
EMA	Erro médio absoluto
EMR	Erro médio relativo
ETA	Modelo atmosférico regional
f_{dp}	Função densidade de probabilidade
GCM	Modelo de circulação geral
GEWEX	Global Energy and Water Cycle Experiment
GOS	Sistema Global de Observação
GTS	Sistema Global de telecomunicações
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPH	Instituto de Pesquisas Espaciais
IRI	International Research Institute for Climate Prediction
JMA	Japan Meteorological Agency
MGB	Modelo de Grandes Bacias
MLT	Média de longo termo
MM5	Modelo atmosférico regional
MNT	Modelo numérico de terreno
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NS	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
NS_{log}	Coefficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P_{ETA}	Precipitação prevista pelo modelo ETA
P_{obs}	Precipitação observada
$\overline{P_{obs}}$	Média das precipitações observadas
P_{prev}	Precipitação prevista
$\overline{P_{prev}}$	Média das precipitações previstas
PREVIVAZ	Modelo estocástico de previsão de vazões médias semanais
PREVIVAZM	Modelo estocástico de previsão de vazões médias mensais
Q_{cal}	Vazão calculada
Q_{corr}	Vazão corrigida
Q_{obs}	Vazão observada
$\overline{Q_{obs}}$	Média das vazões observadas
Q_{prev}	Vazão prevista
r	Coefficiente de correlação
RD	Coefficiente de persistência
$RMSE$	Erro padrão
RV	Redução da variância
SCE-UA	Algoritmo de otimização baseado em Algoritmos Genéticos
SIM	(SAFRAN-ISBA-MODCOM) Modelo hidrológico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOI	Índice de oscilação Sul

SVD	Singular value decomposition
t	Tempo
TSM	Temperatura da superfície do mar
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UHE	Usina Hidrelétrica
USP	Universidade de São Paulo
V	Volume
VIC	Variable Infiltration Capacity
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência do Intertropical
WCI	Umidade do solo no modelo MGB
WMO	World Meteorological Organization

1 INTRODUÇÃO

Quase todas as decisões tomadas no planejamento dos recursos hídricos possuem forte dependência do conhecimento antecipado das condições atmosféricas e hidrológicas, para diferentes escalas de tempo e espaço. Previsões para até alguns meses no futuro podem, por exemplo, auxiliar agricultores a se prepararem para o próximo ciclo de irrigações, ou seja, com base nas previsões podem decidir se a chuva será suficiente ou se terão que buscar formas alternativas de irrigação. Reservatórios de usinas hidrelétricas podem ser operados com base em previsões diárias e sazonais, seja para fins de segurança contra cheias, maximização da produção de energia e aumento da confiabilidade do sistema.

Previsões auxiliam na implantação de sistemas de alerta contra cheias, para tomada de ações que podem mitigar danos materiais sociais e humanos. A capacidade de antecipar a ocorrência de secas prolongadas, meses ou décadas, tem grande impacto sobre o planejamento de recursos hídricos, seja em atividades que atuem dentro ou fora do curso d'água. Em escalas de décadas, ou mais, torna-se importante prever tendências regionais, tais como condições de maior calor, ou frio, e umidade, ou seca, que podem auxiliar no planejamento e estabelecimento de políticas sobre recursos hídricos, que criam impacto sobre diversas questões socioeconômicas.

Em hidrologia, a previsão de vazão num sistema hídrico é definida como a estimativa do escoamento com antecedência definida no tempo. Pode ser diferenciada da predição, que é a estimativa da vazão com um determinado nível de probabilidade com base em dados históricos, sem especificar o instante ou tempo de ocorrência.

Tipicamente, a previsão de vazão pode ser realizada para curto ou longo prazo. A previsão de curto prazo é realizada com antecedência de horas ou alguns dias (~14 dias), enquanto que a previsão de longo prazo é realizada com antecedência de alguns meses (~9 meses).

Os modelos hidrológicos atualmente utilizados realizam previsões apenas com base nas vazões, introduzindo fundamentalmente componentes estatísticos sazonais e temporais de

curto prazo na previsão, baseando-se na quantidade de água que já está nos rios. A previsão da vazão com base na precipitação observada permite estender o horizonte da previsão, ou melhorar a qualidade da previsão dentro de um determinado horizonte, considerando que existe um tempo de deslocamento da água entre a ocorrência da precipitação e a vazão na seção de interesse. Neste caso, normalmente, o horizonte máximo de previsão está limitado pelo tempo de concentração da bacia.

A inclusão de previsões de precipitação num modelo de previsão pode permitir estender o horizonte da previsão para além do tempo de concentração, e melhorar a qualidade da previsão dentro de horizontes determinados. Portanto, uma forma de aumentar a capacidade de previsão é o uso conjunto de modelos climáticos com modelos hidrológicos. Os primeiros prevendo a precipitação e variáveis climáticas futuras e o segundo reproduzindo as vazões nos rios.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados, em relação às metodologias de cálculo utilizadas, como empíricos, conceituais ou combinados. Os modelos empíricos não utilizam conceitos dos processos hidrológicos. A vantagem dos modelos empíricos é a rapidez na elaboração e a facilidade na atualização dos parâmetros em tempo real, enquanto que os modelos conceituais (ou físicos) têm maior capacidade de extrapolação e tratamento das variantes hidrológicas.

Os modelos conceituais, ou físicos, podem ainda ser classificados como distribuídos ou concentrados. Os modelos distribuídos representam a variabilidade espacial dos processos e das variáveis de entrada, o que permite uma melhor integração com as estimativas dos modelos de previsão de tempo e clima.

Uma das desvantagens na aplicação dos modelos distribuídos está relacionada às deficiências de dados necessários ao seu ajuste e operacionalização, podendo acarretar erros de caráter sistemático nas previsões. Para minimizar esse tipo de problema, os modelos físicos podem ser utilizados em combinação com modelos empíricos. Nesse caso uma previsão inicial é produzida com um modelo de base física e, posteriormente, esta previsão é refinada utilizando um modelo empírico mais simples, como um modelo estocástico.

Os modelos atmosféricos por sua vez, são modelos físicos tridimensionais que representam o movimento da mistura ar e vapor de água na atmosfera, e as trocas de calor envolvidas, sujeitos a determinadas condições iniciais e de contorno. Os modelos que representam toda a atmosfera do globo terrestre são denominados modelos globais, e

usualmente têm resolução espacial da ordem de centenas de quilômetros. Normalmente os modelos globais são inadequados para representar as condições das bacias hidrográficas em que se desejam previsões, especialmente quando o relevo é importante na formação das chuvas. Nestes casos são utilizados modelos regionais, que representam apenas uma parte do globo, porém com maior resolução espacial (4 a 40 quilômetros). Os modelos regionais são aplicados utilizando condições de contorno calculadas pelos modelos globais.

De maneira geral, a representação dos processos terrestres no modelo atmosféricos é bastante simplificada, particularmente os fluxos horizontais. Ao longo da última década ocorreu um forte desenvolvimento dos modelos hidrológicos de grande escala, motivados pela necessidade de melhor representar os processos terrestres dentro dos modelos atmosféricos. Mas, ainda são poucos os trabalhos que realmente integram os modelos em modo *on-line*, com interação simultânea dos processos em ambos os sentidos, atmosfera-superfície e vice-versa. A grande maioria dos trabalhos de integração dos modelos tem utilizado a metodologia *off-line*, onde o modelo atmosférico fornece a precipitação para ser utilizada como entrada no modelo hidrológico.

Em aplicações de previsão, utilizando a integração *off-line* entre modelos atmosféricos e hidrológicos, foram obtidos resultados promissores, em nível mundial, somente em anos muito recentes. Portanto, esse é um desafio presente e necessita ser analisado de forma interdisciplinar, agregando conhecimento de diferentes áreas do conhecimento. Ainda existem muitas questões abertas em relação à integração dos modelos. Questões provocadas, principalmente, pelas diferenças entre as escalas de tempo e espaço dos modelos atmosféricos e hidrológicos.

Dentro desse contexto, os recentes desenvolvimentos obtidos na previsão de vazão, com base em previsões atmosféricas, vêm de encontro às necessidades do setor energético brasileiro, que é essencialmente hidrelétrico (>90%) e com baixa diversificação das fontes de geração. Ou seja, possui elevada dependência das condições atmosféricas futuras. Além disso, os modelos de previsão desenvolvidos e atualmente operados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) pertencem à classe dos modelos estocásticos, que exploram somente o conhecimento do passado da bacia para prever o futuro. Dessa forma, o uso de metodologias que incorporem informações climáticas recentes na previsão, como a integração entre modelos atmosféricos e hidrológicos, possui potencial para produzir benefícios importantes para esse setor. E, gerar contribuições para desenvolvimentos nesse sentido é a principal motivação da presente pesquisa.

1.1 Objetivos

Essa pesquisa tem por objetivo principal testar a seguinte hipótese: *É possível aprimorar previsões de vazão de curto e longo prazo, reduzindo as incertezas das estimativas, através do uso integrado de modelos atmosféricos e hidrológicos determinísticos.*

Esse tipo de previsão será denominado como *previsão hidroclimática de vazões* e, para alcançar o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho de um modelo hidrológico físico distribuído para simulação de de bacias hidrográficas com grande variabilidade física e climática;
- Desenvolver metodologia para integração das previsões de precipitação dos modelos atmosféricos globais e regionais com modelos hidrológicos, para gerar previsões de vazão;
- Realizar análise comparativa entre as previsões climáticas dos modelos atmosféricos globais e regionais, a fim de verificar se os modelo regionais apresentam vantagens em relação aos globais;
- Analisar os resíduos da previsão de vazão hidroclimática e utilizar modelos do tipo empírico para reduzir incertezas, através da previsão dos erros futuros.

A bacia do rio São Francisco foi escolhida para o estudo de caso devido aos desafios apresentados em sua modelagem, à dimensão territorial, à grande variabilidade fisiográfica e climática, e por representar um subsistema completo do sistema hidrenergético brasileiro. As previsões são realizadas para toda a bacia do rio São Francisco, mas são analisadas com enfoque nas afluições dos reservatórios hidrelétricos das usinas Três Marias e Sobradinho.

1.2 Organização do Texto

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre previsão de vazões, com as definições adotadas, os tipos de modelos e suas características principais. De forma semelhante, no

capítulo 3 são revisados alguns conceitos sobre a previsão dinâmica de precipitação, destacando as diferenças entre previsão de tempo e de clima, e os modelos utilizados. No capítulo 4 são apresentadas as principais características da metodologia de previsão determinística hidroclimática e a proposta metodológica da pesquisa. Ao longo do Capítulo 5 é apresentado o ajuste do modelo hidrológico na bacia do rio São Francisco, incluindo as características fisiográficas da bacia e os dados básicos utilizados. O Capítulo 6 apresenta os resultados das previsões de precipitação do modelo ETA e os resultados obtidos com o modelo de previsão de vazão de curto prazo, com base nas previsões do ETA. Nesse mesmo capítulo são apresentadas as análises e a modelagem dos resíduos das previsões de vazão, bem como os resultados das vazões corrigidas. No Capítulo 7 são apresentados os resultados das previsões climáticas de precipitação com o modelo AGCM e regional ETA do CPTEC. No Capítulo 8 são apresentados os resultados obtidos com os modelos de previsão de vazão de longo prazo, usando as previsões climáticas de precipitação, e aqueles obtidos com o modelo estocástico PREVIVAZM, utilizado pelo ONS. Finalmente, no Capítulo 9 são descritas as principais conclusões e recomendações da pesquisa.

2 PREVISÃO DE VAZÃO

A previsão de vazão num sistema hídrico envolve a estimativa do escoamento em um curso d'água com antecedência no tempo e é uma das técnicas utilizadas para minimizar o impacto das incertezas do clima sobre o gerenciamento dos recursos hídricos (Tucci e Collischonn, 2003).

Nesse trabalho o termo previsão de vazão é entendido conforme Lettenmaier e Wood (1993), que definem previsão como a estimativa de valores de vazão para um intervalo de tempo específico no futuro. Essa definição é diferente do termo *predição*, que significa a estimativa de condições futuras de vazão sem um tempo específico, tal como a estimativa de vazão para um tempo de retorno.

Dessa forma, a previsão de vazão será classificada em *curto prazo* quando a antecedências for de poucas horas até cerca de 14 dias e em *longo prazo* para antecedência de até nove meses (Georgakakos e Krysztofowicz, 2001)

2.1 Previsão de curto prazo

Usualmente a previsão de curto prazo (antecedência de até 14 dias) é utilizada para minimização dos danos provocados por enchentes (Hsu et al., 2003; Koussis et al., 2003), tanto em planejamento de zonas urbanas ou em sistemas de alerta, mas também pode ser empregada em conjunto com atividades como a geração de energia (Andreolli; 2003; Castanharo et al., 2001; Mine e Tucci, 2002), navegação, irrigação e abastecimento de água.

A previsão de curto prazo pode ser classificada como contínua ou eventual. Quando a previsão é realizada ao longo do tempo, independentemente das condições hidrológicas, a mesma é dita contínua. A previsão eventual é realizada em épocas definidas do regime hidrológico, enchentes ou estiagens em que as condições são críticas para o usuário da água.

A previsão e o alerta de enchentes de um determinado local somente são realizados quando os níveis do rio atingem valores próximos dos críticos. A previsão de níveis para navegação somente é realizada nos períodos de estiagem, quando existe risco do rio não ter calado suficiente. A previsão eventual pode ser realizada para períodos de estiagem ou de enchentes, dependendo do objetivo (Tucci e Collischonn, 2003).

As maiores dificuldades na previsão de vazão geralmente ocorrem em períodos chuvosos, quando a incerteza é maior em função da maior variabilidade da precipitação. Por outro lado, num período de estiagem toda a água disponível já se encontra dentro da bacia, e a previsão depende de metodologia determinista, que envolve principalmente o escoamento subterrâneo na bacia e a propagação do escoamento nos rios.

A previsão de cheia de curto prazo (também chamada de tempo real ou tempo atual), pode ser classificada de acordo com a antecedência desejada e as características da bacia que drena para o local de interesse (Lettenmaier e Wood, 1993). A antecedência de previsão com base na precipitação conhecida depende do tempo de concentração da bacia. Quando esse tempo é pequeno a antecedência que pode ser obtida com um modelo chuva-vazão é também pequena.

Em bacias com tempo de concentração maior é possível utilizar a observação do nível ou da vazão em locais a montante de onde se deseja realizar a previsão, para efetuar essa previsão, pois a antecedência devida ao tempo de propagação das vazões ao longo do rio pode ser suficiente para as medidas operacionais cabíveis. A maior vantagem de se utilizar um posto a montante é que, normalmente, os erros de previsão são menores que aqueles da previsão de um modelo chuva-vazão. No entanto, essa situação somente pode ser utilizada, quando o tempo de deslocamento atende os objetivos da previsão e a contribuição lateral entre os postos é desprezível se comparado com o volume do posto de montante (Tucci e Collischonn, 2003).

As características geológicas e pedológicas das bacias também são importantes na definição do tipo de previsão que pode ser realizada. Bacias com solos e rochas permeáveis favorecem a infiltração da água e geram menos escoamento superficial. Os rios de bacias com estas características têm variações lentas da vazão, ou seja, apresentam grande memória. Bacias com solos rasos e com rochas pouco permeáveis tendem a gerar mais vazão superficial, que escoam mais rapidamente, apresentando memória curta.

2.2 Previsão de Longo Prazo

Previsão de longo prazo (antecedência de até 9 meses) é uma área em recente processo de desenvolvimento na hidrologia, tendo sofrido grande desenvolvimento ao longo da última década. Frequentemente, é utilizada para propósitos de planejamento e operação dos recursos hídricos (Wood, et al. 2002), tais como alocação de água para irrigação, operação de reservatórios de usinas hidrelétricas (Anderson et al., 2002; Hamlet et al., 2002; Hsieh et al., 2003; Druce, 2001), avaliação e implementação de medidas contra secas e inundações (Changnon e Vonnahme, 2003), recursos pesqueiros (Neal et al., 2002), abastecimento de água (Chiew, et al., 2003), agricultura (Wernstedt e Hersh, 2002).

Em alguns anos atrás, a previsão de longo prazo confiável, para fins práticos, era possível somente onde a vazão futura possui maior dependência da água armazenada na bacia do que das condições meteorológicas futuras, principalmente da precipitação (Lettenmaier e Wood, 1993). O conhecimento das condições climáticas futuras, para antecedências de alguns meses, era possível somente com pequeno nível de precisão (Barnston et al., 1999; Gilman 1985), não agregando melhora na previsão de vazão.

Uma técnica que pode ser utilizada é buscar similaridades com relação à sazonalidade regional, como ocorre em bacias onde o período chuvoso é bem definido e, ao término deste, as vazões podem ser previstas para os próximos meses, período de estiagem, apenas pelo esvaziamento do aquífero através da equação de regressão (Villanueva, et al 1987). Da mesma forma, em regimes hidrológicos com grande capacidade de armazenamento e sazonalidade bem definida a magnitude das vazões pode ser estimadas com pequeno erro de variância entre anos. Em sistemas muito lentos as vazões máximas ou mesmo o hidrograma podem ser estimados com base no tempo de traslado que pode levar alguns meses, como no rio Paraguai.

Em anos recentes ampliou-se largamente o entendimento das conexões entre as anomalias climáticas de grande escala e os eventos hidrológicos, de seca ou inundação, ao longo do globo. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando entender estas conexões e, por consequência, propondo metodologias de previsão baseados em indicadores como a Temperatura na Superfície do Mar (TSM), El Niño, La Niña e Pacific Decadal Oscillation (PDO), conforme trabalhos de Anderson et al. (2001), Wood et al. (2002), Chen e Kumar

(2002), Hsieh et al. (2003), Maurer e Lettenmaier (2003), Wernstedt e Hersh (2002), Neal et al. (2002), Pinto (2005) e Cardoso et al. (2005).

Com o melhor conhecimento das conexões climáticas globais e os avanços na simulação numérica de precipitação (Collier e Krysztofowicz, 2000; Golding, 2000), ampliou-se largamente as possibilidades de uso da previsão climática dinâmica de longo prazo (Wernstedt e Hersh, 2002). Estudos realizados em bacias brasileiras (Galvão, 1999; Tucci et al., 2003) mostram que existe grande potencial de benefício na previsão realizada através da integração de modelos determinísticos hidrológicos e climáticos. Estes benefícios são particularmente interessantes no Brasil, em que a matriz energética é, predominantemente, baseada em energia hidráulica. A previsão de longo prazo permite a estimativa de aflúências aos reservatórios hidrelétricos, possibilitando planejar a sua melhor operação e, eventualmente, antecipar a formação de preço da energia.

2.3 Modelos de previsão de vazão

As metodologias normalmente utilizadas para a previsão de vazão podem ser diferenciadas de acordo com as variáveis empregadas para realizar a previsão e de acordo com as metodologias de cálculo.

Com relação às metodologias de cálculo usadas, os modelos podem ser classificados em empíricos, conceituais ou combinados. Dentre os principais técnicas atualmente utilizadas pode-se citar: modelos físicos; modelos estocásticos; modelos estatísticos; modelos de redes neurais; sistemas especialistas; e inteligência artificial.

Os modelos empíricos não utilizam conceitos físicos dos processos hidrológicos. A vantagem dos modelos empíricos é a rapidez na elaboração e a facilidade na atualização dos parâmetros em tempo real, enquanto que os modelos conceituais (ou físicos) têm maior capacidade de extrapolação e tratamento das variantes hidrológicas. Os modelos estocásticos, estatísticos e de redes neurais são empíricos e se baseiam na informação existente na bacia, caso os elementos que permitem a previsão não sejam observados estes modelos passam a reproduzir basicamente a sazonalidade ou a estatística passada, independentemente da sofisticação metodológica. Também utilizam procedimentos empíricos nas relações entre as

variáveis que pode ficar comprometido quando existe forte não-linearidade, como nos processos hidrológicos.

Os modelos conceituais geralmente possuem dois componentes, ou módulos, principais: (a) precipitação-vazão: transforma a precipitação em vazão através da representação do balanço de água no solo e geração de escoamento, incluindo a interceptação, infiltração evapotranspiração, escoamento subterrâneo e superficial; (b) propagação em rios e reservatórios: simula o escoamento em trechos de rios e reservatório a partir da contribuição da bacia obtida do módulo anterior.

Os modelos conceituais, ou físicos, podem ainda ser classificados como distribuídos ou concentrados. Os modelos distribuídos permitem melhor descrever a variabilidade espacial dos processos e das variáveis de entrada. Os modelos distribuídos podem ter estrutura dividida em sub-bacias, quando são denominados semi-distribuídos, ou em grades regulares. A diferença fundamental entre os modelos distribuídos por sub-bacias e por grades está na estrutura de relação entre as características da bacia e dos parâmetros do modelo. Normalmente os modelos discretizados em grades são utilizados com uma resolução maior, e combinados com informações de uso do solo e de outras características físicas, o que permite uma melhor relação entre parâmetro e característica física.

2.3.1 Modelos para previsão de curto prazo

Conforme discutido anteriormente, pode-se agrupar os procedimentos de previsão de curto prazo nos seguintes métodos principais (Tucci, 1998):

- i. *Previsão da vazão com base em níveis ou vazões do rio a montante e dos seus afluentes.* Essa situação é normalmente aplicável quando existe antecedência suficiente e a contribuição lateral é pequena. Aplicações bem sucedidas podem ser encontradas no rio São Francisco entre as Usinas de Três Marias e Sobradinho (ONS, 2001a) e no sistema de alerta contra cheias do rio Doce (CPRM, 2004);
- ii. *Estimativa da precipitação com base em radar e rede telemétrica de pluviógrafos integrada a um modelo precipitação – vazão.* Essa alternativa é uma das mais promissoras dentro do âmbito de pequenas e médias bacias hidrográficas, devido à pequena antecedência dos eventos chuvosos. Essa é a metodologia atualmente empregada pelo National Weather Service (NWS) dos EUA (Smith et al., 2004);

- iii. *Estimativa da precipitação com base em rede telemétrica e transformação em vazão através de modelo hidrológico.* Essa alternativa é inferior a anterior, mas na maioria das bacias não existe radar e a rede telemétrica bem distribuída pode permitir bons resultados. A dificuldade normalmente reside na estimativa da precipitação futura, que deve ser inserida dentro do modelo hidrológico. As alternativas são o uso de previsões meteorológicas e/ou modelos estatísticos para previsão da precipitação. Dependendo do alcance da previsão, pode ser necessária apenas a rede telemétrica.
- iv. *Previsão meteorológica da precipitação, integrada a um modelo precipitação - vazão, para estimar a vazão ou o nível.* Nesta situação obtém-se a maior antecedência possível a partir do início dos eventos, mas os erros potenciais são maiores, já que são agregados os erros da previsão da precipitação e do processo de transformação da mesma em vazão (Collischonn et al., 2005).
- v. *Previsão da vazão com base em níveis ou vazões a montante e com uma das alternativas ii, iii ou iv para a bacia de contribuição lateral.* Essa alternativa contempla a defasagem do deslocamento de montante e a rapidez da contribuição lateral mais próxima à seção principal da bacia.

Em cada uma dessas possibilidades existem diferentes modelos que podem ser combinados para previsão de vazão. Os modelos físicos, ou conceituais, podem ser utilizados em combinação com modelos empíricos. Neste caso uma previsão inicial é produzida com um modelo de base física e, posteriormente, essa previsão é refinada utilizando um modelo empírico mais simples, como um modelo ARMA ou ARIMA.

2.3.2 Modelos para previsão de longo prazo

Para as previsões de longo prazo dentre os principais métodos empregados destacam-se os seguintes:

- i. *Volume armazenado na bacia.* Esse método pode ser utilizado quando existe uma estação úmida seguida por um período de alguns meses sem precipitação. A vazão futura pode ser prevista com base na curva de recessão do hidrograma da bacia (Villanueva et al., 1987);

- ii. *Predição de estatísticas locais, tais como média e desvio padrão.* É o tipo mais simples, e prevê-se sempre o mesmo valor todos os anos, ou meses, caso não seja incorporado um termo aleatório;
- iii. *Modelos estocásticos, que consideram correlações temporais e sazonais.* Esse tipo produz bons resultados quando a bacia possui memória longa, ou seja, o escoamento na bacia se dá de forma lenta, onde predomina o armazenamento subterrâneo ou a declividade é baixa. Em rios de memória curta, os modelos estocásticos produzem resultados equivalentes ao primeiro tipo. A maioria dos modelos usados pelo setor elétrico brasileiro é do tipo estocástico (ONS, 2001a);
- iv. *Modelos baseados na existência de correlações entre vazão e TSM dos oceanos atlântico e/ou pacífico.* Metodologia que sofreu grande desenvolvimento ao longo dos últimos anos. Um dos pontos principais na determinação do modelo reside na existência e detecção das interconexões existentes entre a vazão (ou precipitação) e os indicadores oceânicos (Pinto, 2005);
- v. *Previsão climática dinâmica da precipitação, integrada a um modelo precipitação - vazão, para estimar a vazão ou o nível.* Também depende das interconexões existentes entre a vazão (ou precipitação) e os indicadores oceânicos. Entretanto, eles possuem melhor desempenho nas menores antecedências e os desenvolvimentos têm sido acelerados, sendo que o recente acoplamento entre os modelos atmosféricos e oceânicos poderá trazer grandes progressos para um futuro próximo.

Analogamente as previsões de curto prazo, em cada uma dessas possibilidades existem diferentes modelos que podem ser combinados para previsão de vazão.

2.3.3 Atualização das variáveis do modelo hidrológico

A utilização de modelos de previsão em tempo real normalmente envolve uma fase inicial de ajuste “*off-line*”, usualmente denominada calibração, onde os parâmetros são determinados utilizando-se uma ou mais funções objetivo. Entretanto, para que a formulação de um modelo de previsão de vazões seja completa, sua estrutura deve ser adaptada para incluir procedimentos de atualização durante o processo de previsão (Tucci, 1998, Toth et al., 1999; Madsen e Skotner, 2005; Moore et al., 2005).

Em virtude do caráter “on-line” das previsões, o operador está constantemente recebendo dados observados que podem ser usados para avaliação do desempenho do modelo e para atualização do estado do sistema simulado. Esse processo é fundamental, no caso de previsões de curto prazo, mas é, também, muito importante em previsões de longo prazo em bacias com memória longa. Essa segunda fase é também denominada de correção “on-line” do ajuste inicial.

De acordo com McLaughlin (2002), os hidrólogos serão em breve “inundados” por grandes quantidades de dados, oriundos principalmente de sensoriamento remoto e redes terrestres com telemetria. A assimilação desses dados irá demandar esforços no desenvolvimento de técnicas inteligentes para processar e interpretar grande quantidade de informações em tempo real, para que sejam aproveitadas na melhora da atualização dos modelos de previsão.

A variável mais utilizada para atualização é a vazão, ou nível, mas também podem ser usadas as correções de valores de variáveis como o armazenamento em rios e reservatórios, e em reservatórios (virtuais) do modelo matemático, como o que representa a umidade do solo (Tucci, 1998 e Moore et al., 2005). Estas atualizações são importantes devido às incertezas envolvidas no ajuste dos parâmetros e na estrutura dos modelos. Por exemplo, um modelo linear tem tendência de apresentar bons resultados para as vazões no qual os parâmetros foram ajustados, quando estas vazões ficam longe destes valores, o modelo tende a subestimar ou superestimar, de acordo com as características do sistema real.

Normalmente, os procedimentos usados permitem uma atualização recursiva de estados e parâmetros, baseados nos dados observados de variáveis como a precipitação, temperatura, vazão, volume armazenado e umidade do solo (Hsu et al., 2003). Um novo ajuste dos parâmetros pode ser feito após cada previsão (Tucci, 1998), entretanto, isto pode ser um procedimento computacionalmente pesado em aplicações operacionais e, normalmente, é usado somente quando a estrutura do modelo é bastante simples (Moore et al., 2005).

Uma das técnicas mais utilizadas na atualização de modelos de previsão é conhecida como filtro de Kalman. Normalmente é aplicado em modelos lineares (Lettenmaier e Wood, 1993), mas também pode ser aplicado em modelos não-lineares através do filtro de Kalman estendido (Madsen e Skotner, 2005). Sua maior vantagem é considerar explicitamente as incertezas do modelo e dos dados, fornecendo uma estimativa da incerteza do todo sistema. Entretanto sua maior desvantagem está no peso computacional necessário na propagação do

erro quando aplicado em modelos numéricos complexos, tais como modelos distribuídos ou hidrodinâmicos (Madsen e Skotner, 2005 e Moore et al., 2005).

Quando se consideram modelos hidrológicos distribuídos, uma forma de atenuar o problema, gerado pela grande quantidade de parâmetros e variáveis de estado, é limitar o número de variáveis a serem atualizadas considerando aquelas que são de maior importância para a bacia em análise (Collischonn et al., 2005).

Além disso, pode-se ainda empregar uma forma de atualização simples e bastante eficiente, baseada na análise dos erros, ou resíduos, da previsão. A idéia consiste em corrigir somente a variável de saída do modelo (vazão prevista), ou seja, a correção é feita externamente ao modelo e simplifica consideravelmente o processo de atualização, conforme descrito a seguir.

2.3.4 Previsão dos resíduos (atualização da vazão prevista)

Uma forma de se obter atualização se baseia na previsão do erro, onde as últimas discrepâncias entre vazões previstas e observadas são analisadas de tal forma que uma previsão corrigida possa ser fornecida para o próximo tempo de previsão, adicionando-se o erro estimado à vazão prevista (Mine, 1998). Essa técnica está normalmente baseada na existência de autocorrelação nos erros da previsão, ou seja, os valores previstos constantemente sub ou superestimam os dados observados. Essa persistência nos erros pode ser usada para desenvolver um procedimento de previsão que consiste em uma previsão inicial baseada no modelo hidrológico que, em seguida, é somada com uma correção baseada na diferenças entre valores previstos e observados do passado (Lettenmaier e Wood, 1993). Matematicamente, tem-se:

$$Q_{prev}(t + \tau) = M(P, C, Q_{obs}) + E(t + \tau) \quad (2.1)$$

onde: $Q_{prev}(t + \tau)$ é a vazão prevista no tempo t para a antecedência τ , $M(P, C, Q_{obs})$ representa o modelo hidrológico, que depende da precipitação P , características da bacia e outras variáveis representados por C , e a vazão observada Q_{obs} em t ; $E(t + \tau)$ é o erro previsto para o tempo $t + \tau$, com base na série de erros do passado.

Uma estrutura simples para um modelo de erros pode ser obtida com o uso de um modelo estocástico autoregressivo de ordem um, ou AR(1), descrito como,

$$E(t + \tau) = \rho.E(t) \quad (2.2)$$

onde: $E(t)$ é o erro observado no tempo igual a (t) , e ρ é o coeficiente de autocorrelação com *lag* igual a um intervalo de tempo.

Modelos de erros com maior complexidade podem ser testados, como os autoregressivos de média móvel (ARMA), modelo autoregressivos integrados de média móvel (ARIMA), ou ainda modelos estocástico função de transferência, que permitem introduzir outras variáveis como a chuva e variáveis de estado do modelo hidrológico (Morettin e Toloi, 2004 e Makridaris et al., 1998).

Toth et al. (1999) testou modelos ARMA com diferentes níveis de complexidade na bacia do rio Sieve (Itália), com objetivo de corrigir as vazões previstas por um modelo conceitual. Os autores concluíram que o modelo mais simples, ARMA(1,0), proporcionou melhores resultados. Observou-se também que, além da simplicidade de formulação, o tamanho da série de erros do passado, necessária para calibrar o modelo, teve pouca influência, permitindo ajustar o modelo mesmo com um número limitado de dados. Essa é uma vantagem importante, uma vez que a atualização do modelo dos resíduos também é necessária e modelos complexos podem se tornar o processo demasiadamente demorado.

2.4 Modelos Hidrológicos para Grandes Bacias

De acordo com Hartmann et al. (1999), a maioria dos modelos hidrológicos conceituais ainda é do tipo concentrado, que são adequados para pequenas bacias, pois não representam a variabilidade espacial das características da bacia. Embora tenham sido desenvolvidos diversos modelos do tipo distribuído, apropriados para captar as variações espaciais, o seu uso ainda continua restrito em pequenas bacias, devido às limitações na quantidade de dados necessários para sua aplicação (Singh e Woolhiser, 2002; Troch et al., 2003; Biftu e Gan, 2001).

Em suas recomendações, o GEWEX (1998) adverte que a comunidade hidrológica deve dedicar grande atenção ao desenvolvimento de modelos que expandam seus limites geográficos para áreas de escala continental. Além disso, os modelos hidrológicos devem procurar incorporar os processos que compõem de balanço vertical de energia na superfície, de forma que sejam mais consistentes com os modelos atmosféricos (GEWEX, 1998; Burges, 1998). Os processos envolvidos nas interações entre superfície e atmosfera determinam, por exemplo, qual parcela da chuva irá infiltrar ou escoar superficialmente, bem como a redistribuição da água entre a superfície, solo, aquífero subterrâneo e canais (Troch et al., 2003). Portanto, são importantes para aplicações em atividades como agricultura, estudos climáticos, geração de energia, qualidade da água e prevenção de danos causados por fenômenos naturais.

De acordo com Entekhabi et al. (1999), é economicamente e logisticamente impossível obter dados, através de medidas de campo tradicionais, para atender modelos de escalas continentais de forma adequada. Entretanto, tecnologias com o sensoriamento remoto vêm criando novas possibilidades para a coleta de dados em grande escala, que utilizadas em conjunto com os sistemas de informações geográficas (SIG), permitiram desenvolver, ao longo da última década, diferentes modelos hidrológicos distribuídos. Tais modelos podem incorporar a distribuição espacial de várias informações e condições de contorno, como a topografia, vegetação, tipo e uso do solo, precipitação e evaporação, produzindo informações de saída como umidade do solo, fluxos subterrâneos e de superfície, distribuição vertical da água no solo, dentre outras (Troch et al., 2003).

Dentre os modelos hidrológicos desenvolvidos com estas características pode-se citar o Variable Infiltration Capacity (VIC-2L), descrito por Liang et al. (1994). O VIC-2L possui uma estrutura semelhante aos soil-vegetation-atmosphere transfer scheme (SVATS), e é um dos modelos de grandes bacias mais conhecidos e aplicados. No modelo VIC-2L a bacia é dividida em células regulares e a variabilidade da capacidade de infiltração é representada no interior de cada célula, de acordo com o tipo e uso do solo. Módulos de propagação nas células foram adicionados, permitindo comparar as vazões com valores observados (Nijssen et al., 1997; Lohmann et al., 1998a). Algumas aplicações do modelo VIC-2L, em bacia com áreas entre 30.000 e 700.000 km², são descritas por trabalhos de Abdulla e Lettenmaier (1997a), Lohmann et al. (1998b), Matheussen et al. (2000), Hamlet e Lettenmaier (1999), Jayawardena e Mahanama (2002), Wood et al. (2002), O'Donnell et al. (2000), Maurer e Lettenmaier (2003).

O modelo Large Area Runoff Simulation Model (LARSIM), assim como o VIC-2L, foi desenvolvido para ser um módulo de hidrológico em um modelo atmosférico (Bremicker, 1998 apud Collischonn, 2001). A formulação do LARSIM é semelhante ao VIC-2L, pois divide a bacia em células quadradas e o interior das células é subdividido em blocos que combinam uso do solo e cobertura vegetal.

Collischonn (2001) utilizou a estrutura do modelo LARSIM, com algumas adaptações do modelo VIC-2L, e desenvolveu o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH). Foram feitas modificações importantes, como a simplificação do módulo de balanço de água no solo, módulo de evapotranspiração foi desenvolvido de acordo com os textos de Shuttleworth (1993) e Wigmosta et al.(1994) e foi incluída a metodologia de Muskingum-Cunge para a propagação do escoamento nos canais. O modelo tem sido aplicado com sucesso em bacias brasileiras, com diferentes características, tanto para simulação quanto para previsão (Collischonn, 2001; Tucci et al., 2003; Andreolli, 2003).

Modelos com características e objetivos semelhantes têm sido apresentados por diferentes grupos de pesquisa internacionais, conforme trabalhos de Vörösmarty et al. (1991), Habets et al. (1999), Wang e Takahashi (1998), Arnell (1999), Yao e Terakawa (1999), Anderson e Kavvas (2002).

A utilização de modelos distribuídos para a previsão de vazões pode ser considerada uma tendência mundial, verificada em países como a Alemanha, onde alguns sistemas de previsão utilizam modelos hidrológicos com 1 km de resolução para realizar previsões com cerca de 7 dias de antecedência baseados em previsão de precipitação (www.lfu.baden-wuerttemberg.de) e nos EUA, onde o National Weather Service (NWS) está conduzindo uma concorrência de modelos distribuídos (Smith et al., 2004), com o objetivo de substituir o modelo concentrado *Sacramento Soil Moisture Accounting* (SAC-SMA) para as previsões operacionais de vazão (<http://hydrology.nws.noaa.gov/oh/hrl/distmodel>).

2.5 Resumo do Capítulo

Previsão de vazão é a estimativa do escoamento no curso d'água para um tempo definido no futuro e pode ser classificada, em termos de antecedência, como previsão de curto

e de longo prazo. Nesta pesquisa, adotou-se a classificação sugerida por Georgakakos e Kryzstofowicz (2001), que define previsão de curto prazo como aquela feita para até 14 dias no futuro e para longo prazo a antecedência se estende até 9 meses.

A previsão de curto prazo é normalmente utilizada para minimização dos danos provocados por enchentes, mas também pode ser empregada em atividades como a geração de energia, navegação, irrigação e abastecimento de água. Os modelos de previsão que permitem maiores precisões são aqueles baseados em vazão observada de montante, mas a antecedência possível é curta. Os modelos que permitem maior antecedência utilizam chuva prevista e um modelo hidrológico chuva-vazão, mas com menor precisão nas estimativas.

A previsão de longo prazo é freqüentemente utilizada para propósitos de planejamento e operação dos recursos hídricos, e sofreu grande desenvolvimento ao longo da última década, graças ao entendimento dos efeitos das variáveis oceânicas, como a TSM, sobre as bacias hidrográficas. Isso tornou possível o uso de modelos que empregam a TSM para a previsão de vazões. Esses modelos podem ser empíricos (relações estatísticas) ou dinâmicos.

Pesquisas recentes têm indicado que já é possível obter previsões de vazão de boa qualidade, usando precipitação prevista por modelos dinâmicos como variável de entrada em modelos hidrológicos, tanto para curto como para longo prazo. Estes resultados promissores se devem a desenvolvimentos ocorridos tanto nos modelos atmosféricos como nos modelos hidrológicos, que têm sido adaptados para aplicações em grandes bacias.

Um componente importante dos modelos hidrológicos de previsão diz respeito à atualização dos parâmetros e/ou variáveis de estado, pois permite aumentar de forma significativa a precisão das previsões. O modelo MGB-IPH possui um módulo específico de atualização das variáveis de estado. Outra forma de melhorar a qualidade das previsões é atualizar a variável de saída (vazão), estimando os erros futuros por um modelo do tipo estocástico. Se os erros, ou resíduos, forem sistemáticos podem-se obtidos ganhos significativos na qualidade da previsão.

3 PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO

A precipitação é, possivelmente, o mais óbvio dos elementos do tempo com efeitos em toda sociedade (Golding, 2000). Em sua forma líquida ela pode incomodar ou nos refrescar quando fraca, pode interromper um grande número de atividades quando é moderada, e também pode ser destrutiva quando muito intensa. Se na situação contrária, a sua ausência pode levar a grandes perdas econômicas e, até mesmo, de vidas. Sob o ponto de vista hidrológico, a precipitação é a principal entrada de água nas bacias hidrográficas, e responsável direta pela formação das vazões nos rios. Portanto, a previsão da ocorrência de precipitação, incluindo sua intensidade e distribuição espacial, é um pré-requisito importante em sistemas de recursos hídricos, principalmente quando se necessita de antecedências maiores do que o tempo de concentração da bacia.

De acordo com Collier e Krzyzstofowicz (2000) e Golding (2000), a previsão quantitativa de precipitação pode ser classificada, em termos de tempo de antecedência, como sendo: *i)* Previsão de curtíssimo prazo, para tempos entre 0 e 6 horas a frente; *ii)* previsão de curto prazo, para antecedências entre 6 e 24 horas; *iii)* previsão de médio prazo, quando a antecedência se situa entre 2 e 14 dias; *iv)* previsão de longo prazo, para tempos futuros entre 1 e 24 meses. Entretanto, para efeito das aplicações que serão feitas neste trabalho, essa classificação pode ser resumida conforme a que está sendo considerada para previsão de vazão, que considera somente previsão de curto prazo (0 a 14 dias) e previsão de longo prazo (até 9 meses).

3.1 Previsibilidade atmosférica

A previsão numérica de tempo foi sugerida pela primeira vez em 1922, por Lewis F. Richardson (Kimura, 2002; McGuffie e Henderson-Sellers, 2001), que propôs prever mudanças na circulação da atmosfera pela integração numérica das equações de mecânica dos

flúidos que governam tais processos, ou seja, as equações de Navier-Stokes, a equação da continuidade e a primeira lei da termodinâmica.

Em sua previsão Richardson, utilizou cinco níveis verticais sobre uma região da Europa, próxima da cidade de Viena, e tentou estimar a evolução da pressão, velocidade do vento e densidade, a partir de um estado inicial obtido por observações. Os cálculos, realizados manualmente, para uma antecedência de 6 horas conduziram a valores distantes do real. Seu método passou a ser conhecido como o “Sonho de Richardson”, até que Von Neumann em 1950, utilizando o computador ENIAC, conseguiu uma previsão de pressão bem sucedida, para 24 horas de antecedência. E, desde então, técnicas numéricas cada vez mais sofisticadas foram implementadas, acompanhando os desenvolvimentos dos computadores eletrônicos e dos métodos de observação do tempo. Atualmente, simulações em computador são realizadas diariamente em diversos centros de meteorologia de todo o globo, para prever o estado futuro da atmosfera com antecedências que vão de alguns dias até mais de 50 anos.

Entretanto, os processos que envolvem a circulação geral da atmosfera são extremamente complexos e, devido ao seu comportamento caótico (em termos matemáticos), sua evolução no tempo não pode ser determinada de forma completa (Marengo et al., 2003; Stockdale, 2000). De forma simplificada, pode-se considerar que as previsões atmosféricas dependem de duas componentes de forças (Marengo et al., 2003): a) As componentes das forças externas, responsáveis pelas variações lentas e prolongadas; b) As componentes das forças internas, que representam as variabilidades rápidas, de curto prazo. De acordo com a teoria do caos (Lorenz, 1973), as componentes das forças internas do sistema atmosférico podem, potencialmente, serem previstas com antecedência de aproximadamente 14 dias, ou seja, não é possível fazer previsões de tempo para meses ou anos no futuro, no sentido de se obter uma seqüência correta de eventos atmosféricos, dia após dia. Essa limitação é determinada pela taxa de crescimento dos inevitáveis erros na estimativa inicial do estado da atmosfera (Stern e Easterling, 1999).

Em função dessas características, é importante neste ponto fazer uma distinção entre os dois tipos de previsão atmosférica usualmente adotados (Stern e Easterling, 1999):

- a) *Previsão de tempo.* Se refere a previsão feita para até 14 dias de antecedência. A escala de temporal característica para as mudanças nas condições de tempo nas latitudes médias é de apenas alguns dias ou menos. Nos trópicos, principalmente sobre os oceanos, o tempo tende a ser bastante constante, ou seja, com tempo ensolarado e

ventos constantes pontuados por uma chuva forte ao final do dia ou uma tempestade em intervalos regulares de alguns dias;

b) Previsão de clima. Indica a previsão para antecedências maiores, normalmente meses no futuro. O clima pode ser definido como a “estatística” média das condições de tempo em determinado período, que contenha vários eventos de tempo. A temperatura média no inverno é uma variável climática, assim como a chuva média no mês de Janeiro, em determinado local. A escala de tempo característica do clima é de um mês ou mais.

Nos itens seguintes são apresentadas algumas considerações importantes, para o melhor entendimento das diferenças entre a previsão de tempo e a previsão de clima.

3.1.1 Previsão de tempo

Os princípios básicos da atual previsão numérica de tempo são exatamente os mesmos propostos por Richardson (Kimura, 2002), ou seja, a evolução temporal da atmosférica é calculada resolvendo-se numericamente as equações que descrevem os processos de circulação, com as condições iniciais fornecidas através de uma extensa rede meteorológica de observação.

Previsões de tempo, ou seja, estimativas do estado da atmosfera em alguns dias no futuro, são feitas diariamente em diversos países utilizando diferentes modelos. Para que isso seja possível, são coletados dados da superfície terrestre e de diferentes camadas da atmosfera, através de medições em estações na superfície, balões meteorológicos, aviões, radares, navios, bóias oceânicas e satélites (Figura 3.1). Esses dados são armazenados em formatos padrões e transmitidos via Internet ou pelo Sistema de Global de Telecomunicações (GTS), onde são disponibilizados para os centros nacionais de previsão (Stern e Easterling, 1999). Portanto, para que a operação deste complexo sistema seja viável, é crucial a capacidade de todos os países, inclusive os mais pobres, de manter em funcionamento as estações de medição, garantindo uma cobertura global de observações e que os dados sejam distribuídos gratuitamente.

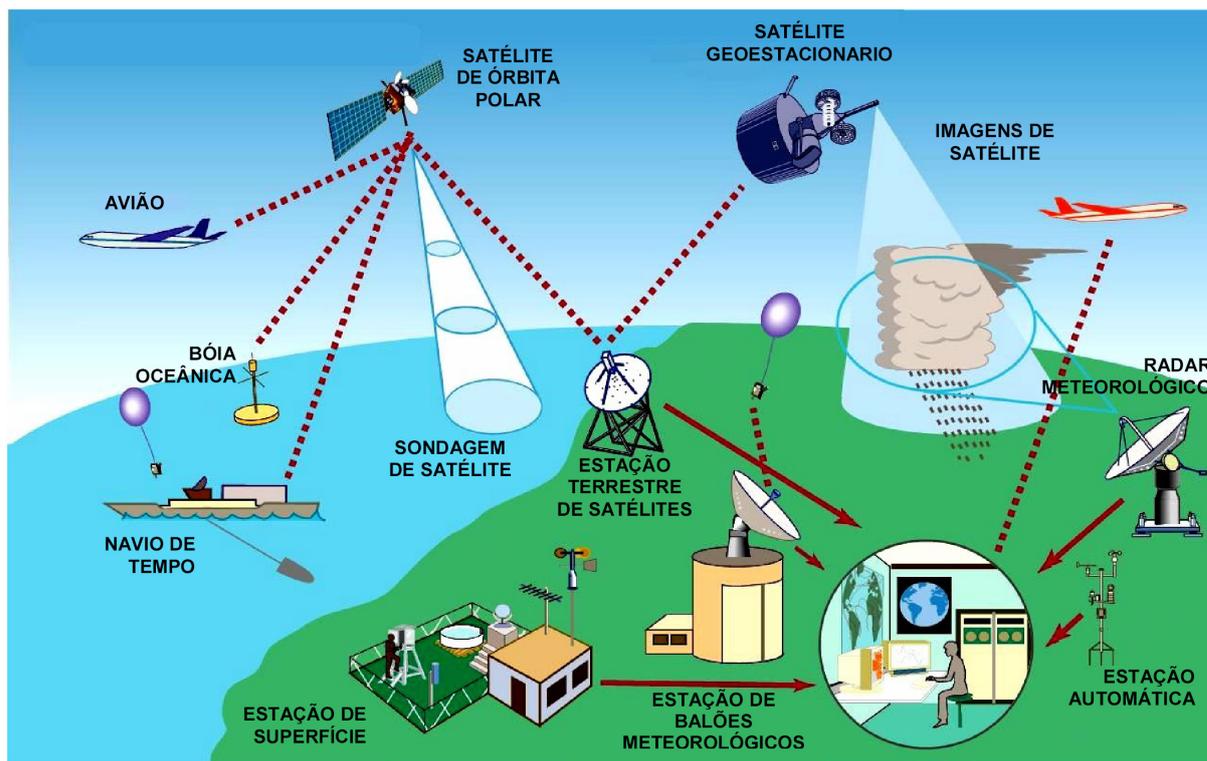


Figura 3.1: Sistema Global de Observação (GOS). Coleta, transmissão e processamento de dados meteorológicos para suporte à previsão de tempo e clima (WMO, 2005).

Os dados coletados são assimilados pelos modelos de previsão atmosférica e realiza-se uma estimativa “ótima” do estado atual da atmosfera, também chamada de “nowcast”. Essa estimativa não é simplesmente a visualização dos dados observados, mas sim uma análise do estado da atmosfera, uma vez que os dados observados são muito esparsos, em diversas regiões do globo, para definição de uma condição inicial adequada aos modelos numéricos. A estimativa “nowcast” deve ser entendida como uma interpolação espacial e temporal dinamicamente consistente, com objetivo para ampliar os limites da rede de dados disponível (Stern e Easterling, 1999).

Para realizar previsões numéricas também é necessário estimar, além do estado inicial da atmosfera, algumas condições de contorno que influenciam o comportamento da atmosfera, embora de forma muito mais lenta. Algumas condições de contorno são a TSM, cobertura de gelo e neve, cobertura vegetal e umidade do solo. Com essas estimativas, o modelo de previsão de tempo é inicializado e faz previsões para até 10 dias no futuro, nos casos mais comuns. Mas em alguns centros as previsões já são feitas operacionalmente para até 15 dias a frente.

Apesar de todos os avanços, a precipitação ainda continua sendo uma das variáveis mais difíceis de prever, uma vez que seus processos possuem grande variabilidade temporal e espacial (Habets, et al., 2004). Golding (2000) afirma que as previsões de precipitação com maior nível de precisão são aquelas feitas para antecedências entre 6 horas e 2 dias e, portanto, são as que possuem maior utilidade. As previsões para antecedências menores do que 6 horas (“nowcasting”) tendem a conter baixa confiabilidade, por possuírem elevada dependência das condições iniciais e a evolução da precipitação ser extremamente rápida, função dos processos convectivos.

Kimura (2002) apresenta o gráfico da Figura 3.2, que mostra a precisão das previsões em função do tempo de antecedência, para o European Centre for Medium-Range Weather Forecast – ECMWF e o Japan Meteorological Agency – JMA. Nota-se que as curvas são bastante semelhantes para ambos os centros, e a precisão sempre reduz com o aumento da antecedência. Considerando-se que a previsão possui utilidade prática quando a precisão é maior do que 80% (Kimura, 2002), a Figura 3.2 indica que as previsões feitas pelo ECMWF são de boa qualidade para 80 horas de antecedência, aproximadamente. Kerr (2004) também aponta que, atualmente, as previsões de qualidade são feitas para até 4 dias de antecedência e, que previsões de baixa qualidade, mas com alguma utilidade prática são realizadas para até 8 dias.

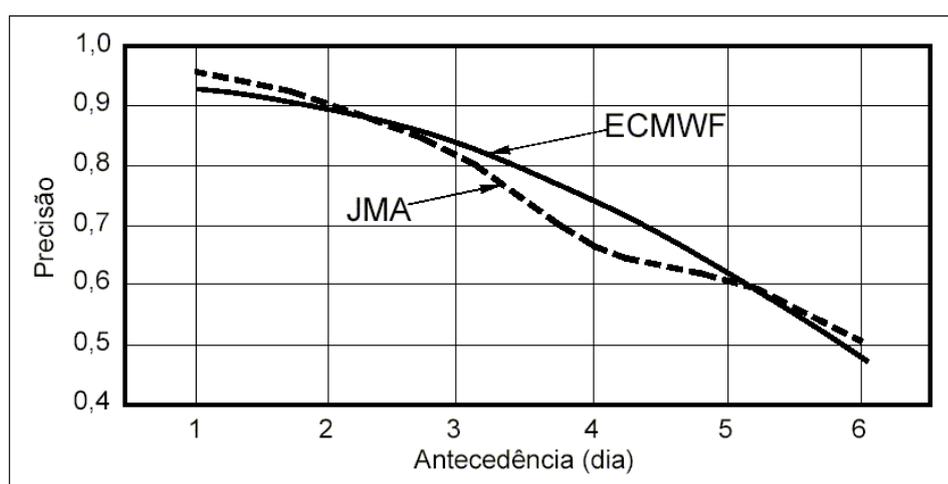


Figura 3.2: Precisão da previsão de tempo em relação ao período de antecedência, para o ECMWF e JMA (Kimura, 2002)

Entretanto, cabe ressaltar que os progressos na previsão de tempo têm sido bastante acelerados nos últimos anos, reduzindo as incertezas e ampliando cada vez mais os limites de

utilidade das previsões. A precisão das previsões também pode variar em função do local e das condições atmosféricas no momento da previsão. O uso de novos produtos, como a previsão por conjuntos (*ensemble forecasting*), traz a possibilidade de extrair informações adicionais das previsões, como, por exemplo, uma indicação sobre o nível de confiabilidade de uma determinada previsão.

3.1.2 Previsão climática

Embora o comportamento caótico da atmosfera imponha limites a previsão determinística de seu estado, é possível identificar pistas que indicam prováveis padrões de comportamento no futuro (Stockdale, 2000). De forma que a previsão climática, para alguns meses no futuro, pode ser entendida como a previsão de mudanças nas funções distribuição de probabilidades do clima. Isto é possível porque a atmosfera tem grande interação com a superfície, através da troca constante de fluxos de calor, momento e água.

Portanto, o comportamento do clima depende fortemente do estado da superfície, que pode ser caracterizada por sua temperatura, refletividade e umidade do solo. Dessa forma, mudanças na condição da superfície irão causar conseqüentes alterações no estado da atmosfera. Mas, tais mudanças se processam numa velocidade muito menor do que os fenômenos que ocorrem na atmosfera, provocando alterações no que são perceptíveis no comportamento médio do tempo, ou seja, do clima (Stern e Easterling, 1999).

As principais condições de contorno, externas ao sistema atmosférico, que influenciam a variabilidade climática são: temperatura da superfície do mar (TSM), gelo dos oceanos, albedo, umidade do solo, e cobertura de neve.

Sob um ponto de vista global, a TSM é a principal responsável pelas variações no clima, de um ano para outro. A temperatura do oceano é mais estável do que a da superfície terrestre, devido à grande capacidade de calor da água e à eficiência na mistura contínua entre água da superfície e de camada inferiores. Anomalias de TSM são da ordem de 1°C em magnitude, abrangem escalas espaciais de milhares de km e duram entre um e vários meses. Estas são características que fazem com que as anomalias de TSM tenham capacidade de influenciar o comportamento geral de circulação da atmosfera (Stockdale, 2000; IRI, 2004a), particularmente a TSM nas zonas tropicais e nos eventos mais intensos de El Niño ou La Niña (Marengo et al., 2003).

Para ilustrar a importância da TSM, a Figura 3.3 apresenta uma representação esquemática de um padrão de comportamento típico do oceano Pacífico Equatorial. Nota-se que durante os anos de El Niño (Figura 3.3b), caracterizado por elevação na TSM, ocorre uma clara alteração nos padrões atmosféricos sobre oceano Pacífico, afetando diversas regiões continentais, com o aumento ou redução na intensidade nas precipitações. Padrões típicos de alteração no comportamento da chuva e temperatura em diferentes partes do globo, durante a ocorrência de El Niño, são mostrados na Figura 3.4.

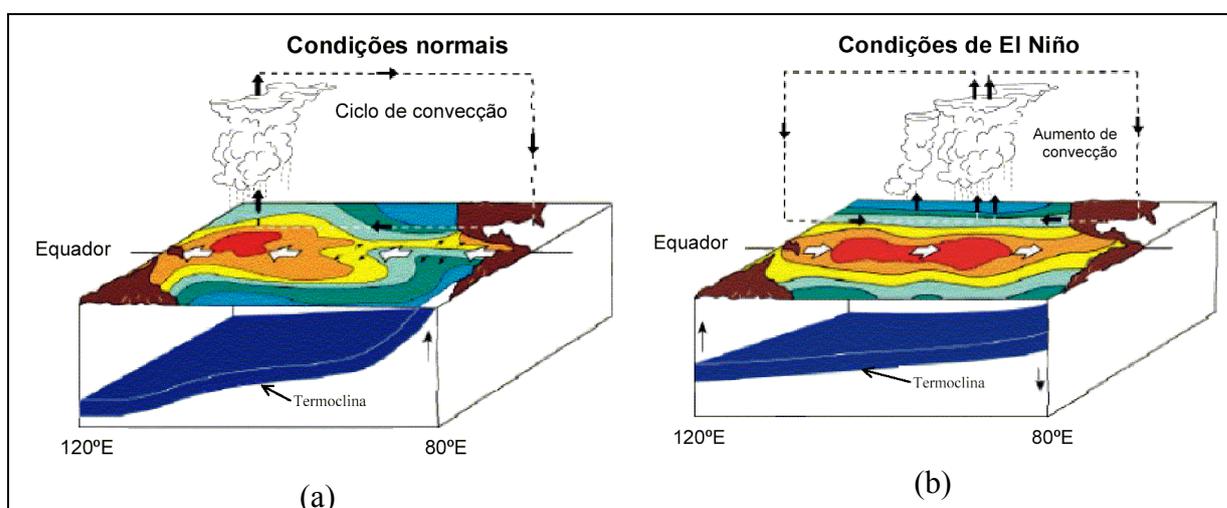


Figura 3.3: Representação esquemática dos padrões de comportamento atmosférico sobre o oceano Pacífico, em função da TSM (Fonte: Sampaio, 1999).



Figura 3.4: Típicos padrões de chuva e temperatura associados com a ocorrência de El Niño (Fonte: CPTEC, 2005a).

É importante salientar que, embora o El Niño e La Niña sejam os mais fortes sinais de variabilidade interanual conhecidos, eles não são os únicos. Uma região pode apresentar variabilidades interanuais importantes que podem ser fortemente influenciadas por fenômenos de TSM que não estão ligadas ao El Niño, ou La Niña (Stern e Easterling, 1999).

De acordo com Marengo et al. (1998), uma análise espectral aplicada às séries de vazões na usina de Sobradinho mostra grande variabilidade no período de 12 a 16 anos e de 2 a 4 anos. O primeiro pico representa a variabilidade em escala decadal, que poderia estar associada a padrões de variabilidade interdecadal na região, já identificados em estudos anteriores (Nobre e Shukla 1996), tais como a possível influência da Oscilação do Atlântico Norte (NAO) e do dipolo de TSM no Atlântico tropical. A NAO e a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) mostram os efeitos de grande escala das condições de temperatura da superfície do mar dos Oceanos Atlântico subtropical Norte e Pacífico, respectivamente, que poderiam afetar a circulação regional em escalas de 20-30 anos. O dipolo de temperatura da superfície do mar do Atlântico tropical representa o gradiente de TSM no Atlântico Norte e Sul próximo à linha do Equador, de forma que quando o Atlântico tropical sul está mais quente que o norte, a estação chuvosa no norte do Nordeste brasileiro é mais abundante. O segundo pico corresponde à variabilidade típica de escalas de ENSO (El Niño – Oscilação Sul) no Pacífico, com frequência entre 2 e 7 anos. Os resultados de Marengo et al. (1998) mostram que a variabilidade decadal associada ao Atlântico tem um impacto mais importante na variabilidade de vazões em Sobradinho que a variabilidade associada a escalas de tempo típicas de El Niño.

Por sua forte característica de indicador climático a TSM, de diferentes regiões oceânicas, tem sido utilizada em distintos tipos de modelos de previsão climática, embora se possa considerar que existem duas estratégias principais de previsão (Stockdale, 2000):

c) Modelos empíricos. Que usam séries observadas de TSM para estabelecer correlações e prever o futuro. Possuem uma longa história de desenvolvimentos e aplicações, com início no final do século XIX. Atualmente, são utilizadas técnicas como a Regressão Linear Múltipla, análise de correlação canônica (CCA) e “Singular Value Decomposition” (SVD), Redes Neurais e outras técnicas estatísticas, com objetivos de prever tanto a TSM ou usá-la para prever variáveis climáticas em diferentes partes do globo. Entretanto, não serão tratados neste trabalho;

d) *Modelos dinâmicos*. Neste caso a TSM é utilizada como condição de contorno, para forçar modelos numéricos que resolvem as equações dinâmicas que descrevem os processos físicos da atmosfera.

De maneira geral, pode-se dizer que os modelos dinâmicos têm potencial de fornecer previsões mais precisas e com informações mais completas, uma vez que tratam os processos na atmosfera de forma fisicamente consistente. A desvantagem reside no grande número de dados necessários e na enorme capacidade computacional requerida.

As principais técnicas utilizadas pelos modelos dinâmicos, para realizar previsões climáticas baseadas em TSM são (IRI, 2004a; Marengo et al., 2003):

- i) Rodada de controle, que utiliza valores climatológicos de TSM;
- ii) Anomalias de TSM persistidas: utiliza-se o dado de anomalia de TSM do último mês de observado; somado ao campo médio climatológico de TSM do mês de previsão em questão;
- iii) Anomalia de TSM previstas pelo modelo acoplado oceano-atmosfera;
- iv) Previsão de anomalias de TSM de modelos estatísticos.

Pode-se utilizar uma combinação dos três últimos métodos (ii, iii, iv), ou seja, para a mesma previsão usam-se métodos diferentes para determinar a TSM em distintas regiões dos oceanos. Além disso, ao valor de anomalia soma-se a climatologia de TSM do mês em questão.

Entretanto, devido à grande interação entre superfície e atmosfera, a forma mais adequada de realizar as previsões climáticas é o acoplamento dos modelos atmosféricos com os de superfície. No caso dos modelos oceânicos, esse procedimento já é realizado por alguns centros de previsão, são os chamados modelos acoplados atmosfera-oceano. A tendência é que as previsões ganhem maior precisão pela inclusão da representação dinâmica dos oceanos. Futuramente, poderão ainda ser acoplados os modelos dinâmicos de outras partes da superfície, que representem com maior detalhe, por exemplo, a vegetação, a umidade do solo e o escoamento em rios e lagos.

Também é importante destacar que, embora tenham ocorrido progressos significativos no Sistema de Observação Global, muitas das limitações detectadas nas previsões climáticas dinâmicas se devem a escassez de dados para inicializar os modelos, principalmente dados dos oceanos. Somente o oceano pacífico possui um sistema de observação específico para a

previsão climática (Stern e Easterling, 1999). Existem regiões do globo em que a densidade inadequada de dados oceânicos inviabiliza a obtenção de estimativas confiáveis da TSM.

Por estas características da previsão climática, embora os modelos atmosféricos gerem previsões com intervalos de até 6 horas, as estimativas operacionais realizadas pelos centros de previsão são, tipicamente, expressas em termos de anomalias climáticas ou “tercis” de probabilidades (próximo da média, abaixo ou acima da média), para cada ponto de grade do modelo e valores médios de 3 meses. Essa convenção tem o efeito de minimizar os erros da previsão, pela redução dos “ruídos” associados a variabilidade do tempo e espaço, que podem mascarar a previsibilidade das variações climáticas sazonais (Hansen e Indeje, 2004).

3.1.3 Prevista de tempo estendida (previsão mensal)

A previsão de tempo para o horizonte de até 15 dias é, essencialmente, um problema de condição inicial da atmosfera, uma vez que as variações nos oceanos não podem afetar significativamente a atmosfera nesta escala de tempo. Por isso, a previsão de tempo é feita com base somente em integrações dos processos da atmosfera. No caso das previsões climáticas, utiliza-se a longa memória da circulação oceânica (alguns meses) e o fato da variabilidade na TSM de regiões tropicais terem impacto importante sobre a circulação global da atmosfera. Por isso, alguns centros de previsão utilizam modelos acoplados oceano-atmosfera nas previsões climáticas (ECMWF, 2005).

Dessa forma, a escala de tempo entre 15 e 30 dias se caracteriza como uma área ainda pouco estudada da previsão atmosférica. De acordo com ECMWF (2005), esse horizonte é, provavelmente, curto o suficiente para guardar alguma memória das condições iniciais e também é longo o bastante para que a variabilidade dos oceanos tenha impacto na circulação da atmosfera. Assim, centros como o European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), tem realizado previsões mensais (para até 32 dias no futuro) através de um sistema que combina características da previsão de tempo tradicional e da metodologia de previsão climática, utilizando as integrações de um modelo acoplado oceano-atmosfera.

No Brasil, o CPTEC/INPE ampliou o alcance da previsão do modelo global de 12 para 15 dias e, brevemente, será implementado um sistema de previsão de tempo estendida para 35 dias, através de um modelo acoplado oceano-atmosfera (Sampaio, 2005).

Dentre os benefícios da previsão mensal, destaca-se que ajudará na avaliação dos impactos da resolução atmosférica nas previsões sazonais, além de permitir um maior detalhamento do primeiro mês da previsão climática, onde é originada uma parcela significativa dos erros das previsões de longo prazo (ECMWF, 2005).

3.1.4 Erros na precipitação prevista

Apesar dos desenvolvimentos recentes, o uso da precipitação prevista por modelos numéricos de tempo e clima como entrada em modelos hidrológicos, para previsão de vazões, é ainda limitado por três tipos de erros (Habets et al.; 2004):

- i) Distribuição espacial dos eventos, uma vez que erros de alguns quilômetros na localização da chuva podem levar a grandes erros na vazão;
- ii) Distribuição temporal da precipitação, devido à resposta da bacia ser altamente dependente desta distribuição;
- iii) Intensidade da precipitação. Podem ocorrer erros sistemáticos de sub ou superestimativa da precipitação.

Por estas razões, a precipitação prevista por modelos numéricos deve, para a maioria dos casos, ser utilizada em associação com outras ferramentas, como correções estatísticas e adaptações regionais, para corrigir alguns erros antes dar entrada no modelo hidrológico (Habets et al., 2004).

3.2 Modelos Dinâmicos de Previsão da Precipitação

Modelos dinâmicos de previsão atmosférica são desenvolvidos com o objetivo representar com equações físicas os processos que compõem não somente a atmosfera, mas todo o *sistema climático*. De acordo com McGuffie e Henderson-Sellers (1997), o sistema climático é definido como composto pela totalidade da atmosfera, hidrosfera (oceanos), biosfera e geosfera, assim como suas interações. Entretanto, as interações entre esses sistemas passaram a ter relevância nas modelagens somente a partir de 1975, e hoje são reconhecidas como de extrema importância para o entendimento do comportamento do clima. Na Figura

3.5 tem-se uma representação esquemática dos componentes e interações do sistema climático.

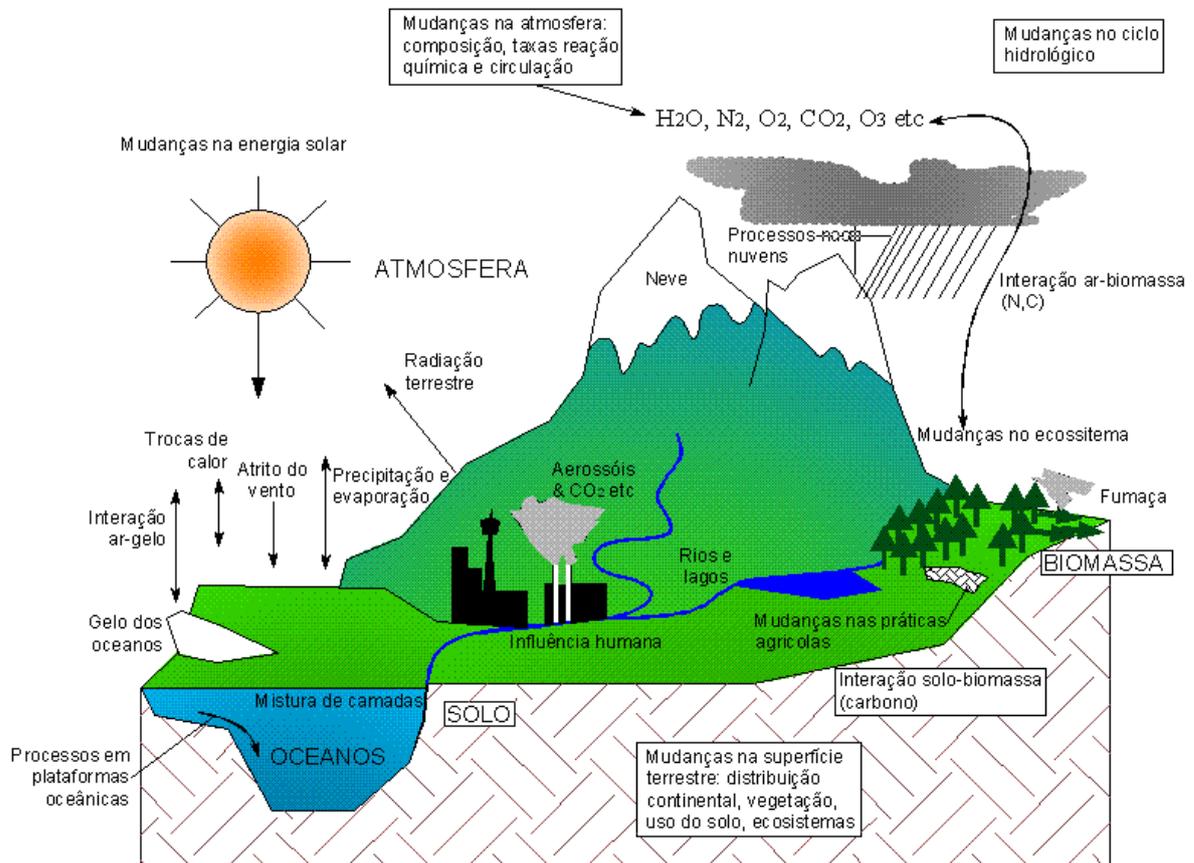


Figura 3.5: Componentes do sistema climático e interações (adaptado de McGuffie e Henderson-Sellers, 1997).

Ao longo do processo de desenvolvimento dos modelos, a atmosfera foi o primeiro componente a ser simulado, que, devido a baixa densidade e facilidade de movimento, é o mais “nervoso” subsistema do clima. Uma das maiores dificuldades é a modelagem da precipitação, pois muitas questões relacionadas a dinâmica das nuvens são difíceis de serem resolvidas com sucesso.

O acoplamento da atmosfera com os oceanos tornou-se usual somente em anos recentes. Uma das causas para a dificuldade em acoplar estes componentes está na diferença de escalas temporais e espaciais que envolvem os processos físicos de cada subsistema, mas reside também no fato de que o acoplamento atmosfera-oceano é extremamente dependente da latitude. Nos trópicos estes sistemas são, naturalmente, bastante acoplados, especialmente

em termos de temperatura. Em latitudes médias o acoplamento é fraco, devido principalmente à transferência de momento, mas em latitude altas o acoplamento é bastante forte, devido principalmente à salinidade, que está envolvida na formação da camada de águas profundas dos oceanos. A troca de dióxido de carbono entre atmosfera e oceano, que é controlada pelos processos bioquímicos, também varia em função da posição geográfica (McGuffie e Henderson-Sellers, 1997).

Um componente importante que também foi incorporado é a criosfera (gelo e neve). Inicialmente devido à sua grande influência nas trocas radiativas, devido ao albedo elevado, mas hoje se sabe que a maior influência está ligada ao seu efeito isolante. O gelo dos mares, por exemplo, desacopla o oceano da atmosfera causando mudanças consideráveis em ambos os subsistemas. A neve tem efeito semelhante nos continentes, porém com menor intensidade.

Recentes estudos sobre mudanças climáticas mostram que a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera é fortemente dependente da biota, tanto terrestre quanto marinha. Efeitos provocados pelas atividades humanas, como a emissão de gases e mudanças no uso do solo, são reconhecidamente importantes, mas talvez representem o mais difícil desafio da modelagem climática. Outros fenômenos como o “buraco da camada de ozônio” também influenciam o clima, por causar alterações na composição química da atmosfera. A inclusão destes processos ainda está em estágios iniciais, mas a comunidade científica reconhece que o desenvolvimento de um modelo climático totalmente acoplado deverá obrigatoriamente incorporá-los (Bonan, 2002).

Desde que os modelos atmosféricos começaram a ser desenvolvidos, a cerca de 40 anos atrás, descobriu-se que o sistema aparentemente simples, imaginado nos estudos iniciais, é extremamente complexo, contendo conexões e alimentações fortemente não-lineares e difíceis de identificar e reproduzir. Nos itens seguintes faz-se uma distinção entre os modelos ditos globais, que simulam todo o globo, e os modelos atmosféricos regionais, que simulam em maior detalhe áreas com escalas próximas àquelas consideradas em hidrologia.

3.2.1 Modelos de Circulação Geral (GCM)

De acordo com McGuffie e Henderson-Sellers (2001), que apresentam uma revisão do desenvolvimento histórico dos modelos de dinâmicos de previsão atmosférica, atualmente o termo Modelo de Circulação de Geral (GCM) refere-se aos modelos que contêm a

representação tridimensional do sistema acoplado atmosfera e oceano. Quando o modelo considera a representação física somente da atmosfera o termo usualmente empregado é Modelo de Circulação Geral Atmosférico (AGCM).

Como descrito anteriormente, os GCM's são modelos matemáticos tridimensionais no espaço que consideram os principais processos que governam os movimentos da atmosfera e dos oceanos. Para isso é resolvida uma série de equações que descrevem os fluxos de energia, momento, conservação de massa e leis dos gases. A superfície terrestre é dividida em uma grade horizontal regular, com várias camadas verticais na atmosfera e nos oceanos, conforme mostrado esquematicamente na Figura 3.6. O conjunto de equações é então resolvido para essa grade tri-dimensional usando técnicas numéricas.

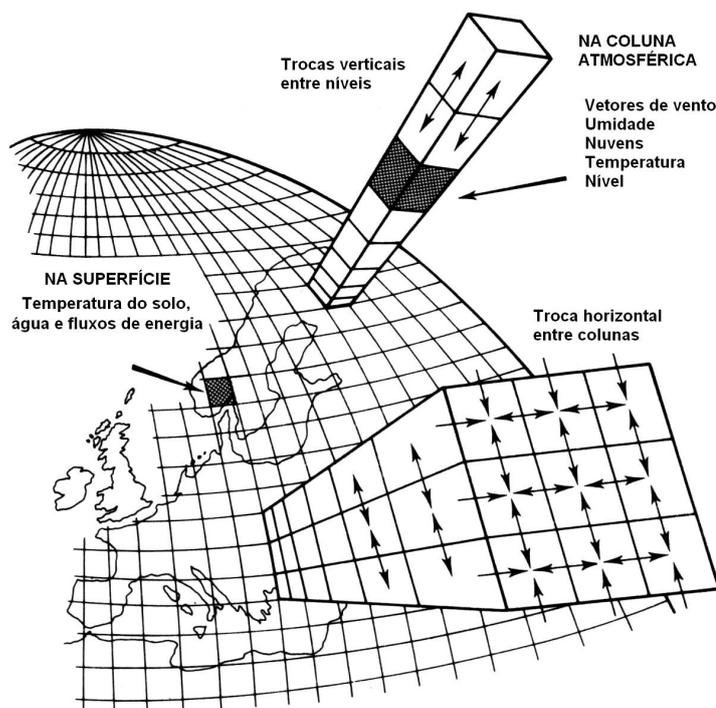


Figura 3.6: Discretização espacial dos modelo AGCM (Adaptado de MacGuffie e Henderson-Seller, 1997).

A Figura 3.7 apresenta uma representação esquemática dos principais processos simulados pelos modelos globais, que geralmente discretizam o globo em elementos horizontais de 100 a 1000 km, para as previsões climáticas e até menos de 50 km nas previsões de tempo, e 1 a 5 km na vertical. A topografia e os processos físicos do sistema em cada elemento são valores médios (IRI, 2004a, Tucci, 1998).

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

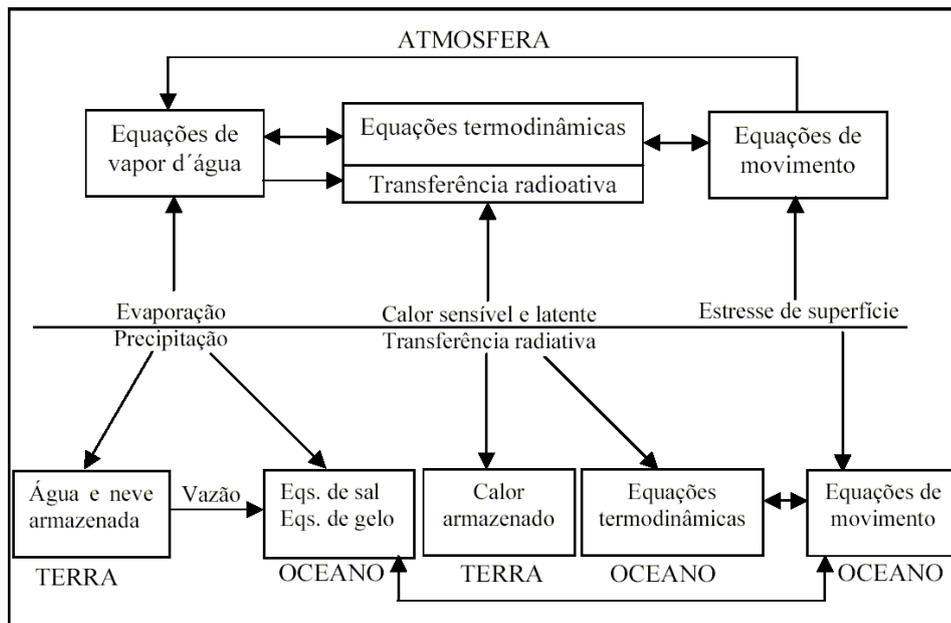


Figura 3.7: Interações entre atmosfera, oceanos e continentes, representadas pelos modelos globais (Adaptado de Kimura, 2002).

A modelagem tri-dimensional dos oceanos é dificultada pela escala espacial dos escoamentos, que é muito menor do que na atmosfera, e porque os oceanos demoram muito mais tempo para responder às mudanças externas. A circulação das águas profundas dos oceanos pode demorar centenas ou até milhares de anos para se completar. Isto causa problemas numéricos complexos na acoplagem dos modelos, mas que atualmente já estão bem resolvidos e, por isso, os modelos atmosfera-oceano estão se tornando comuns (MacGuffie e Henderson-Seller, 1997).

O código de modelos GCM geralmente possui milhares de linhas de comando e estão sempre em contínuo desenvolvimento, agregando novos procedimentos teóricos e avanços na ciência da computação. A maioria dos pesquisadores que realizam experimentos com os mais complexos modelos, normalmente modificam somente alguns componentes particulares a

determinados processos. A complexidade destes modelos faz com que somente quando existe um compartilhamento de esforços é que progressos significativos podem ser alcançados (Palmer et al., 2005).

Diversos centros de pesquisa atualmente realizam, operacionalmente, previsão de tempo e clima em escala global. Recentemente, foram criados grandes experimentos, envolvendo os principais centros de pesquisas mundiais na área, para investigar a capacidade de previsão dos modelos GCM, demonstrando o grande interesse científico e da sociedade pelo desenvolvimento desses modelos (Shukla et al., 2000; Anderson e Ploshay, 2000; Graham et al., 2000; Palmer et al., 2005).

Dentre as principais limitações dos modelos globais, em relação às aplicações em recursos hídricos, pode-se destacar: *a)* A discretização retrata somente os processos atmosféricos de macroescala na superfície da terra; *b)* Muitos processos são representados com fortes limitações no modelo, tais como os processos hidrológicos, por exemplo, que variam na microescala. Atualmente existem diversos projetos no globo que buscam melhorar essa representação (GEWEX, 1998); *c)* O custo e o tempo de processamento para uma discretização mais detalhada destes modelos é extremamente elevado. Entretanto, trabalhos recentes têm mostrado que já é possível obter resultados promissores na previsão de vazões (Tucci et al., 2003).

3.2.2 Modelos regionais de previsão (“downscaling”)

Os modelos globais de previsão climática possuem resolução espacial da ordem de 100 a 1000 km. Entretanto, o clima regional pode ser controlado por fatores com escala espacial típica bem menor. As características da topografia, tipo de vegetação, distribuição terra/água podem causar significativa influência no clima regional. Um exemplo se refere as brisas marítimas e as circulações atmosféricas induzidas por vales e montanhas, diferenças no uso do solo, forma da costa, dentre outras (Hay e Clark, 2003; Roads et al., 2003).

Com mencionado anteriormente o custo computacional de previsões com um modelo global de alta resolução é muito elevado, mas uma alternativa é o chamado "downscaling", que consiste de uma técnica de adensamento, onde se utiliza um modelo atmosférico de resolução mais alta (regional), alimentado nas fronteiras pelas condições produzidas pelo modelo global. Conforme representado na Figura 3.8, o modelo regional usa as condições de

fronteira na célula *B* do modelo global (resolução de 200x200 km), para gerar uma simulação com resolução de 40x40 km, internamente a *B*, de forma que os processos de troca de energia entre a atmosfera e a superfície são mais bem descritos que no modelo global.

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

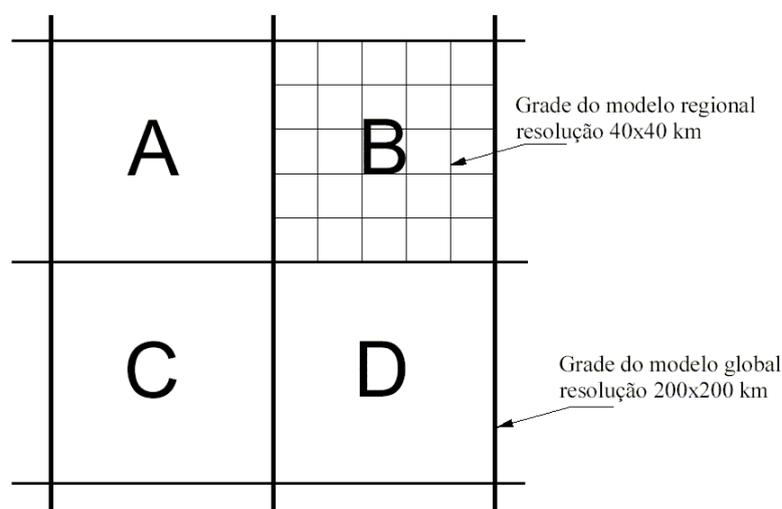


Figura 3.8: Detalhamento da resolução dos modelos climáticos através da técnica de “downscaling”

Por melhor representar os processos que agem regionalmente, acredita-se que os modelos regionais podem produzir previsões de tempo e clima com maiores precisões. Roads et al. (2003), Hay e Clark (2003), Hay et al. (2002) destacam que, embora tais modelos sejam promissores, a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos até o momento apresenta resultados que se concentram em demonstrar a viabilidade de usar os modelos. Mas, uma vez demonstrada essa viabilidade, é necessário que existam esforços para confirmar que, em escala regional, os resultados são melhores, ou não, do que aqueles produzidos por modelos globais.

Embora ainda sejam em pouco número, as aplicações dos modelos atmosféricos regionais na área de recursos hídricos mostram que, de maneira geral, são obtidos melhores

resultados do que utilizando os modelos globais (Anderson et al., 2002; Hay et al., 2002; Hay e Clark, 2003; Ibbitt et al., 2001; Kite, 1997; Koussis, et al., 2003; Roads et al., 2003). Fato explicado pela melhor representação física, por parte dos modelos regionais, das características geográficas e processos que ocorrem na escala das bacias hidrográficas.

Todos estes autores salientam que os resultados ainda são preliminares, e que os modelos regionais ainda deverão passar por muitas modificações para serem efetivamente validados. Porém, Kerr (2004) salienta que, devido ao aumento na capacidade dos “chips” de processamento e as técnicas de computação através de “clusters” (de custo muito menor do que os supercomputadores), a tendência futura é cada região, de países como Brasil e EUA, possua um modelo atmosférico regional que seja adaptado as suas características e necessidades.

3.2.3 Previsão por conjunto (“ensemble forecast”)

A partir dos trabalhos de Lorenz (1973), sabe-se que as equações que representam os movimentos da atmosfera mostram alta sensibilidade às condições iniciais, ou seja, erros pequenos nas condições iniciais podem levar a grandes erros na previsão futura, mesmo que os modelos sejam perfeitos. Isto se deve não somente ao fato de que os modelos numéricos não conseguem reproduzir a grande complexidade dos processos que compõem a evolução das condições atmosféricas, mas também aos erros inerentes a falta de representatividade espacial e temporal dos dados observados que alimentam os modelos (Lorenz 1973; Goddard et al., 2000; CPTEC, 2004; Anderson e Ploshay, 2000, Marengo et al., 2003).

De maneira genérica, uma descrição completa do problema de previsão climática pode ser entendido em termos da evolução temporal de uma função densidade de probabilidade (f_{dp}) do estado da atmosfera (Taylor e Buizza, 2000, Stockdale, 2000, Wilks, 1995). A Figura 3.9 mostra uma representação esquemática da previsão por conjunto, na qual o estado inicial da atmosfera é representado por uma função distribuição de probabilidades igual a f_{dp_0} , resultante das incertezas iniciais. Baseada na “melhor” estimativa deste estado inicial, pode-se produzir uma única previsão (linha mais espessa contínua) que, neste caso, falha em prever o correto estado futuro (linha tracejada). Na mesma figura, uma previsão de conjunto (linhas pretas finas), iniciando de condições iniciais perturbadas, é usada para estimar as

probabilidades do estado futuro, representado por fdp_t . Assim, o valor médio dos membros do conjunto será melhor representativo do comportamento observado (linha tracejada).

De acordo com CPTEC (2004), para criação de uma previsão por conjunto, primeiro supõe-se que os modelos sejam perfeitos, ou seja, considera-se apenas a incerteza nas condições iniciais. Em seguida, busca-se através de técnicas específicas, simular os erros decorrentes das observações para criar um conjunto de condições iniciais perturbadas. Finalmente, o conjunto de previsões é gerado pelo modelo a partir de cada um destes novos cenários perturbados. Dentre as técnicas mais conhecidas de geração das condições iniciais perturbadas pode-se destacar o “Breeding of Growing Modes” utilizado no National Centers for Environmental Prediction - NCEP (EUA), o “Singular Vectors” utilizado pelo European Centre for Medium-Range Forecasts - ECMWF (Europa) e o “EOF-based perturbation” empregado pelo CPTEC (Brasil). Apesar de serem metodologias diferentes, ambas as técnicas buscam estimar os modos de crescimento mais rápido associados aos erros na condição inicial.

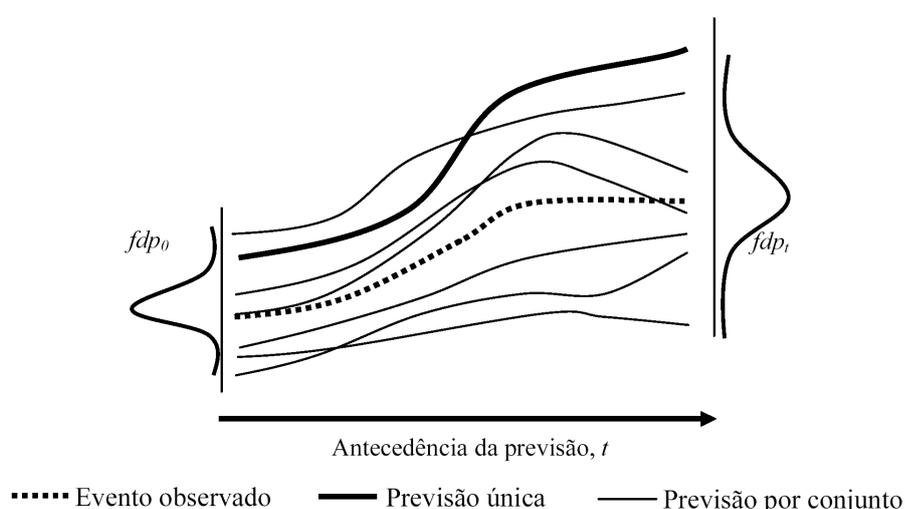


Figura 3.9: Representação esquemática do sistema de previsão por conjunto (“ensemble”)

Para contornar a necessidade de criar um número ilimitado de condições iniciais, que representem todos os estados possíveis da atmosfera, o que não é viável na prática, parte-se do conhecimento de que os erros crescem com uma taxa que depende do regime de circulação da atmosfera, da estação do ano e do domínio geográfico. Com isto, pode-se construir uma quantidade limitada de condições “ótimas”, eliminando aquelas que gerem previsões muito semelhantes entre si (CPTEC, 2004).

A utilização de dois ou mais modelos é outra forma de obter um conjunto de previsões, que tem sido explorada por alguns centros de previsão. Como no International Research Institute for Climate Prediction (IRI) são disponibilizadas previsões climáticas resultantes da combinação das integrações de 4 modelos globais diferentes (IRI, 2004). No Brasil, o IAG/USP e CPTEC/INPE, em conjunto com outras instituições nacionais e internacionais, implementaram um produto que permite combinar estatisticamente a previsão de tempo de diversos modelos (IAG, 2005).

Dentro desta linha de pesquisa, recentemente foram divulgados os resultados de um experimento denominado *Development of a European Multimodel Ensemble System for Seasonal-to-Interannual Prediction – DEMETER* (Palmer et al., 2004; Hagedorn et al., 2005, Doblas-Reyes et al., 2005). No projeto DEMETER foram utilizados 7 modelos dinâmicos globais, que representam o atual estado-da-arte dos modelo acoplados atmosfera-oceano. Estes modelos foram executados em um mesmo supercomputador e produziram previsões de conjunto para até 6 meses de antecedência, que foram gravadas com mesmo formato e analisadas com a mesma metodologia. Os resultados mostram que existem benefícios importantes na previsão climática por conjuntos com multi-modelos, melhorando a confiabilidade das previsões. Esse projeto terá continuidade e, dentre os futuros objetivos, deve explorar o desenvolvimento de um sistema unificado de previsão climática por conjunto, que englobe escalas temporais sazonais, de décadas e até séculos (Palmer et al., 2005).

Diversos centros de previsão em todo o globo têm adquirido experiência em previsão por conjunto, desenvolvendo novos produtos e produzido um grande número de trabalhos, que demonstram ser essa uma ferramenta complementar muito útil para previsão numérica de tempo e clima, e que tem se mostrado de grande utilidade para os usuários finais da previsão (Cantelaube e Terres, 2005; Graham et al., 2000; Morse et al, 2005; Mylne, 2002; Richardson 2000; Smith et al., 2001; Taylor e Buizza, 2000; Zhu et al., 2002).

3.3 Resumo do Capítulo

A precipitação é a principal fonte de água que abastece as bacias hidrográficas. Por isso, a estimativa de sua ocorrência no futuro é de fundamental importância para a previsão de vazões. Nesse sentido, a previsão de precipitação através de modelos atmosféricos dinâmicos,

ou numéricos, têm apresentado grandes avanços em anos recentes, tanto para curto como para longo prazo.

A previsão de precipitação pode ser dividida em dois tipos principais: previsão de tempo, para até 15 dias, e previsão climática, que se estende por alguns meses. A previsão de tempo é feita com base somente em integrações dos processos da atmosfera, permitindo determinar uma evolução detalhada desses processos. Previsões com alguma utilidade prática são feitas rotineiramente para horizontes com cerca de 8 dias ou mais, dependendo da região do globo e das condições atmosféricas no início da previsão.

No caso das previsões climáticas, é utilizada a longa memória da circulação oceânica (alguns meses) e o fato da variabilidade na TSM de regiões tropicais ter impacto importante sobre a circulação global da atmosfera. Neste tipo de previsão normalmente se obtém uma tendência média do comportamento futuro da atmosfera. Por isso os resultados são usualmente analisados em termos mensais trimestrais ou semestrais.

Recentemente está se desenvolvendo um terceiro tipo de previsão atmosférica, denominado previsão de tempo estendida (para até 35 dias no futuro) através de um sistema que combina características da previsão de tempo tradicional e da metodologia de previsão climática, utilizando as integrações de um modelo acoplado oceano-atmosfera.

Os tipos de erros mais comuns na precipitação prevista se referem à distribuição espacial e temporal dos eventos e a intensidade da precipitação. Mas, de maneira geral, estes erros podem ser corrigidos ou minimizados através do uso de técnicas estatísticas.

O termo Modelo de Circulação Geral (GCM) refere-se aos modelos atmosféricos que contém a representação tridimensional do sistema acoplado atmosfera e oceano. Quando o modelo considera a representação física somente da atmosfera a denominação usualmente empregada é Modelo de Circulação Geral Atmosférico (AGCM).

Os modelos anteriores simulam todo o globo terrestre, mas existem os modelos chamados de regionais, que utilizam condições de contorno dos modelos globais para simular regiões específicas com maiores detalhes. Esta técnica é denominada *downscaling* e está sendo utilizadas operacionalmente para previsões de tempo e clima.

Um procedimento que tem se desenvolvido bastante na previsão atmosférica é a chamada previsão por conjunto (*ensemble forecasting*), que gera um conjunto de possíveis estados futuros da atmosfera com base nas incertezas dos dados iniciais e/ou nas limitações

dos modelos numéricos. Esse tipo de previsão possibilita obter uma previsão mais precisa, além de permitir inferir sobre os limites de confiabilidade da previsão.

4 PREVISÃO HIDROCLIMÁTICA

A proposta metodológica desta pesquisa visa introduzir componentes determinísticos ao processo de previsão de vazões do sistema hidrelétrico brasileiro, para redução das incertezas em relação aos modelos atualmente empregados, os modelos estocásticos. Estes modelos exploram a memória da bacia hidrográfica, que geralmente não excede a muitos dias após a ocorrência da precipitação.

Introduzindo as informações climáticas e suas relações globais, é possível antecipar um pouco mais o comportamento das precipitações sobre a bacia, permitindo a geração de previsões confiáveis de vazão para maiores antecedências. Para isso serão utilizadas previsões de precipitação geradas por modelos atmosféricos, que serão inseridas com variáveis de entrada em modelo hidrológico. Essa metodologia de previsão será aqui denominada de *previsão hidroclimática de vazões*.

Na Figura 4.1 é mostrada esquematicamente a importância de se utilizar as previsões quantitativas de chuva em combinação com modelos chuva-vazão e variáveis observadas. Essa figura representa uma previsão feita a partir do instante T_0 . Tradicionalmente, se considera que a chuva é igual a zero após o instante T_0 , podendo conduzir a grandes erros em antecedências que ultrapassam o tempo de concentração da bacia. No caso da metodologia proposta nessa pesquisa, é utilizada chuva observada em T_0 e chuva prevista pelos modelos atmosféricos, podendo reduzir significativamente o erro da previsão de vazão, conforme representado na Figura 4.1.

Nos itens seguintes é apresentada uma revisão sobre os principais aspectos relacionados com a integração dos modelos atmosféricos e hidrológicos, para a previsão de vazões, e a descrição da metodologia aplicada nesta pesquisa, que utiliza a bacia do rio São Francisco como estudo de caso.

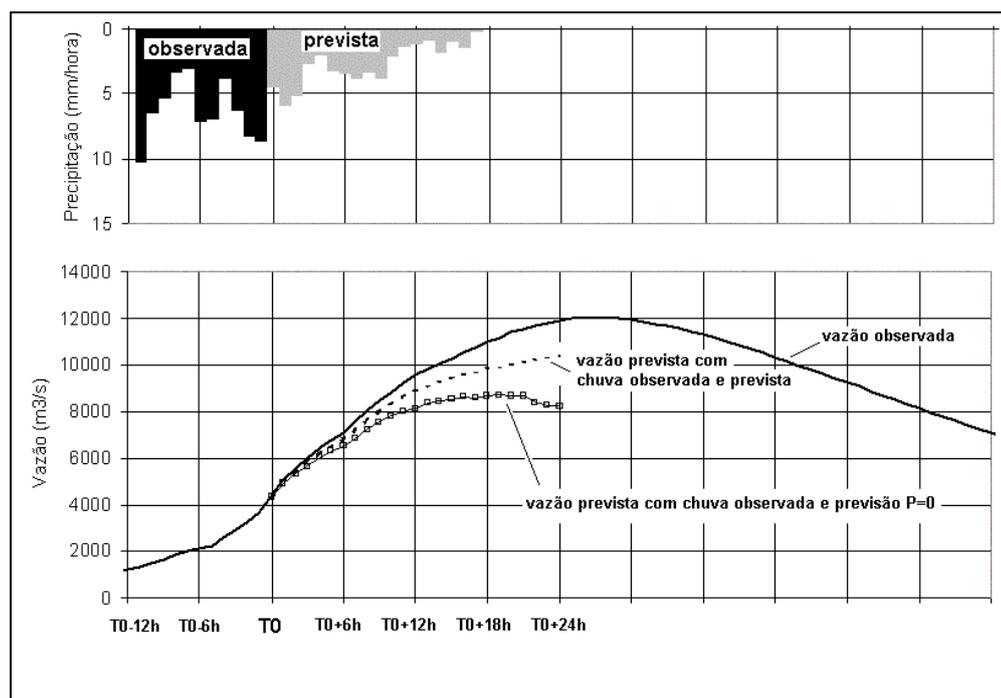


Figura 4.1: Resultados hipotéticos de previsão de vazão, a partir de um instante T_0 , com base na chuva já ocorrida ou com base na chuva já ocorrida e na chuva prevista (Collischonn et al, 2005).

4.1 Integração dos Modelos Atmosféricos e Hidrológicos

Conforme citado anteriormente, o desenvolvimento dos modelos hidrológicos de grande escala foi motivado pela necessidade de melhor representar os processos terrestres dentro dos modelos atmosféricos. Entretanto, ainda são poucos os trabalhos que realmente acoplam os modelos em modo *on-line*, com interação simultânea dos processos em ambos os sentidos, atmosfera-superfície e vice-versa (Evans, 2003; Gutowski et al., 2002; Seuffert et al., 2002).

A grande maioria dos trabalhos de acoplagem dos modelos tem utilizado a metodologia *off-line*, onde o modelo atmosférico fornece a precipitação e/ou temperatura para ser utilizada como entrada no modelo hidrológico. Neste caso o modelo hidrológico não interage com o atmosférico. Alguns trabalhos que usam esta técnica para fazer apenas simulação são descritos por Hay e Clark (2003), Hay et al. (2002), Ibbitt et al. (2001), Jayawardena e Mahanama (2002), Kite (1997), Miyaoka et al. (1999).

Em aplicações de previsão de curto prazo, Anderson et al. (2002) utilizaram precipitação prevista pelos modelos ETA e MM5 para gerar vazões na bacia do rio Calavera (Califórnia, EUA). A antecedência máxima das previsões foi de 48 horas, com precipitação prevista a cada 6 horas. Avaliaram-se as vazões da bacia para precipitação gerada com resolução de 40 km, pelo modelo ETA, e 4 km para o MM5, utilizando o modelo hidrológico HEC-HMS. De forma semelhante, Koussis et al. (2003) realizaram previsões com 48 horas de antecedência para a bacia do rio Kifissos (2.190 km²), localizada dentro da área urbana de Atenas, Grécia. Utilizou-se o modelo regional BOLAM, para previsão de precipitação, com 6 km de grade, e um modelo chuva-vazão distribuído por sub-bacias.

Os resultados mostram que, embora as previsões tenham apresentado dificuldades em representar os picos dos hidrogramas, Os modelos conseguiram captar as variações de vazão na bacia. Em ambos os trabalhos é salientado que os resultados são promissores, uma vez que existem desenvolvimentos a serem feitos e que a metodologia poderá se tornar uma importante ferramenta na operação de reservatórios, uma vez que representa importantes ganhos em termos de antecedência na previsão.

Como parte do experimento global GEWEX, Habets et al. (2004) testaram previsão operacional de vazão de curto prazo (até 3 dias), na bacia do rio Rhone (França), de 96.000 km². Para previsão da precipitação foram usados dois modelos numéricos de tempo, em operação na França, Action Recherche Petite Echelle Grande Echelle - ARPEGE (resolução de 25 km) e Aire Limitée Adaptation Dynamique, Développement International – ALADIN (resolução de 15 km). A precipitação prevista foi usada como entrada para um modelo hidrológico denominado SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM), com resolução de 8 km. Os resultados obtidos indicam que, embora o modelo hidrológico utilizado seja sensível as condições iniciais de neve e umidade do solo, a qualidade da previsões de vazão é melhor do que as técnicas usualmente empregadas. Devido aos resultados promissores, o sistema está sendo implantado para previsão operacional em todo território francês.

Collischonn et al. (2005) realizaram previsão de vazão afluente ao reservatório da usina hidrelétrica de Machadinho, localizada no rio Uruguai (32.000 km²). Foram utilizados o modelo hidrológico MGB-IPH e as previsões de precipitação fornecidas pelo modelo regional Advanced Regional Prediction System – ARPS, operado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). As previsões foram realizadas para antecedências de até 48 horas. Os resultados mostraram que as previsões de vazão com base chuva prevista apresentaram ganhos significativos na estimativa de eventos extremos de cheia, para antecedência de mais

de 10 h. Para previsão continua a metodologia apresentou bons resultados em antecedências acima de 16 h. Esse limite corresponde ao tempo de resposta da bacia até a usina de Machadinho, ou seja, após 16 h a influência da chuva observada cai rapidamente.

Para previsões de longo prazo, Wood et al. (2002) utilizaram conjuntos de previsões de precipitação acumulada mensal e médias mensais de temperatura, com 6 meses de antecedência, produzidas pelo modelo espectral global (GSM) do National Centers for Environmental Prediction (NCEP), EUA, de resolução 2,8125 grau (latitude e longitude). Os dados gerados pelo modelo global foram utilizados como entrada para o modelo hidrológico de macroescala Variable Infiltration Capacity (VIC), descrito por Liang (1994), com resolução de 1/8 grau. Empregou-se uma metodologia estatística para correção de erros sistemáticos nas previsões geradas pelo modelo global. Os resultados foram analisados em termos qualitativos e indicam que o procedimento empregado obteve sucesso para transmitir os sinais da previsão climática às variáveis hidrológicas de interesse dos recursos hídricos.

Tucci et al. (2003) utilizaram uma metodologia semelhante para realizar uma análise quantitativa na bacia do rio Uruguai (62.200 km²), localizada na Região Sul do Brasil. Determinaram-se previsões de vazão para até 5 meses de antecedência, combinando-se o modelo climático global do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com o modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH) desenvolvido por Collischonn (2001). Os resultados mostram que, para a bacia do rio Uruguai, as precipitações previstas pelo modelo climático possuem um erro sistemático em relação aos dados observados. Para corrigir esse erro, desenvolveu-se uma metodologia baseada numa transformação da distribuição de probabilidades de precipitação diária. Com a combinação das previsões climáticas corrigidas e o modelo hidrológico distribuído, obteve-se uma redução de 54% do erro da previsão de vazão (redução de variância) no rio Uruguai, em relação às previsões obtidas pelo método tradicionalmente empregado, que se baseia nas médias ou medianas mensais. Além disso, é utilizado um conjunto de 5 previsões baseado na técnica de conjunto do modelo climático, permitindo gerar uma banda de incertezas das previsões.

Os resultados de Tucci et al. (2003) indicam que já existe um grande potencial para utilização dos modelos baseados em previsão climática sazonal em recursos hídricos. Entretanto, os resultados promissores do rio Uruguai não podem ser generalizados para outras bacias, uma vez que os modelos de previsão climática são fortemente dependentes da existência de conexões com as condições oceânicas. É preciso explorar estes resultados em

outras bacias, onde, por exemplo, as correlações com a TSM são mais fracas, para que se avaliem os impactos nas previsões hidrológicas.

4.1.1 Correção de erros na precipitação prevista

Conforme mencionado no capítulo anterior, a precipitação prevista por modelos numéricos pode ser utilizada em associação com ferramentas estatísticas para correção de dos erros mais comuns. Algumas técnicas de correção são descritas a seguir.

Correção de erros sistemáticos

Conforme mostrado por Marengo et al. (2003), os modelos climáticos globais são ajustados para simular a circulação da atmosfera em todo o planeta, por isso, alguns locais terão uma boa representação e outros não. As previsões de precipitação, quando comparadas diretamente aos dados observados normalmente mostram que, para muitas regiões, os modelos globais apresentam um desvio sistemático em relação às observações. Como exemplo, na Figura 4.2 são apresentadas as precipitações totais mensais para um ponto de grade localizado na região nordeste do Brasil (célula com centro nas coordenadas 37,5° O e 10,26° S). Neste gráfico estão apresentadas as precipitações simuladas pelo modelo global do CPTEC, compostas por um conjunto de nove simulações e a média das mesmas, além dos valores observados na rede de estações locais. Nota-se que o modelo capta bem a variabilidade interanual, ou seja, distingue bem os anos secos e úmidos, mas superestima sistematicamente os valores de precipitação.

A metodologia de correção dos erros sistemáticos mais empregada está baseada numa transformação da curva de distribuição de probabilidades de precipitação, conforme apresentado nos trabalhos de Hay e Clark (2003), Tucci et al. (2003), Hay et al. (2002) e Wood et al. (2002). Neste método, para cada mês do ano e para cada ponto da grade de previsão do modelo climático são desenvolvidas duas curvas de distribuição de probabilidade: a dos dados observados e a dos valores previstos de chuva diária.

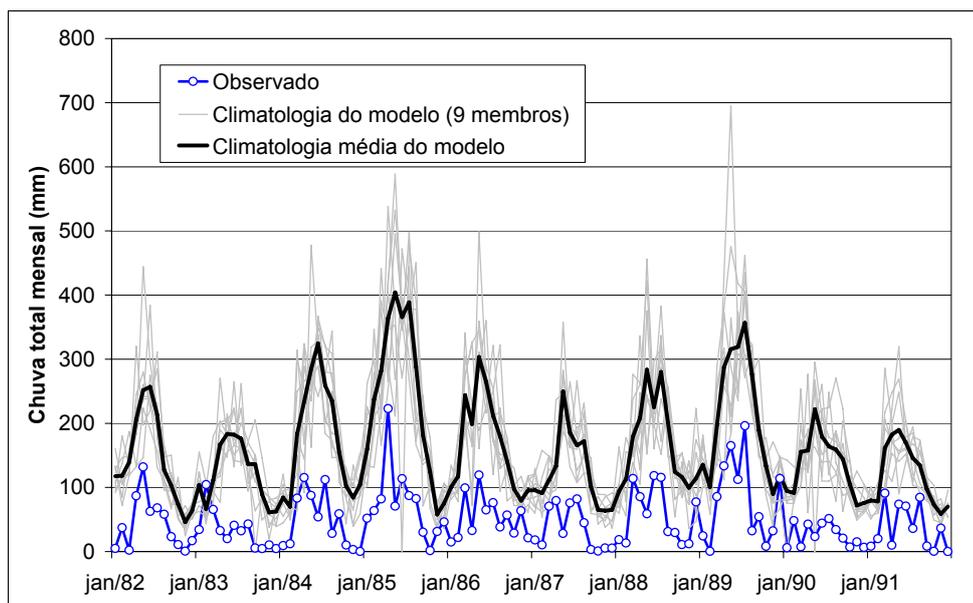


Figura 4.2: Erros sistemáticos na precipitação acumulada mensal simulada pelo modelo global do CPTEC, para a célula centrada nas coordenadas $37,5^{\circ}$ O e $10,26^{\circ}$ S.

Nas simulações do modelo regional usado por Hay e Clark (2003) e Hay et al. (2002), as correções foram feitas para os valores de totais mensais, com o ajuste da distribuição de probabilidades do tipo Gama. De forma análoga, para o trabalho de Wood et al. (2002), as correções foram feitas para os valores mensais de precipitação prevista, utilizando como referência 21 anos de dados observados e simulados pelo modelo GSM, ou seja, a climatologia observada e a climatologia do modelo. Wood et al. (2002) utilizaram distribuições empíricas de probabilidades, combinadas com as distribuições teóricas Valores Extremos Tipo I e III para extrapolar os valores inferiores e superiores aos encontrados na climatologia. Para o caso de Tucci et al. (2003), não se dispunha da climatologia do modelo atmosférico, por isso utilizou uma parte do período de previsão para construir curvas empíricas de probabilidades diárias para os 12 meses do ano, ou seja, foram feitas correções nos valores acumulados diários previstos.

Em ambos os trabalhos, citados acima, concluiu-se que a metodologia da curva de probabilidade foi eficiente em corrigir os erros de magnitude das precipitações. Porém, todos salientam que existem limitações, ligadas a duas razões principais:

- i) a representatividade do período da climatologia, usado como referência para as correções, que pode ser tendencioso;

- ii) a variação dia após dia da precipitação não é bem representada na previsão climática dos modelos atmosféricos, mesmo que os valores acumulados mensais estejam corretos.

Logo, a correção eficiente dos erros sistemáticos poderá depender de uma metodologia eficaz de redistribuição dos totais mensais previstos, para valores acumulados diários, conforme descrito no item seguinte.

Redistribuição temporal da precipitação

Conforme já citado anteriormente, os modelos de previsão climática opera gerando precipitação em intervalo de tempo menor do que 1 dia, e para alguns meses no futuro. Entretanto, mesmo que os valores mensais acumulados estejam corretos, de maneira geral, essa informação diária não reproduz corretamente toda a variabilidade da precipitação observada. Isto ocorre devido às características da previsão climática, que essa baseada nas condições de contorno externas (normalmente a TSM), e à baixa resolução espacial dos modelos, que distorcem a distribuição temporal da precipitação.

De acordo com Hansen e Indeje (2004), os modelos climáticos dinâmicos tendem a produzir muitos eventos de chuva, com pouca quantidade por evento. Com isso, o valor total mensal pode estar correto, mas eventos de alta intensidade, que ocorrem normalmente, podem não estar sendo reproduzidos. Estes erros são mais pronunciados nas regiões tropicais (IRI, 2004a), e podem provocar sérias distorções quando essa previsão é introduzida nos modelos hidrológicos, uma vez que poderá ser criada uma tendência em aumentar as perdas por evaporação e redução do escoamento superficial.

Para corrigir essa limitação da previsão climática de precipitação, têm sido propostos diversos métodos para desagregar os valores acumulados sazonais (ou mensais) em seqüências de totais diários, adequados aos intervalos de tempo dos modelos hidrológicos. IRI (2004a) destaca que uma técnica bastante utilizada consiste em usar informações sobre estatísticas das séries observadas para ajustar um modelo estocástico que gere seqüências de chuva diária, consistentes com o local de referência. Um modelo típico deste tipo é normalmente montado em associação com um modelo de Cadeia de Markov, que é uma técnica estatística amplamente utilizada para descreve uma série temporal de estados discretos. No caso da precipitação, são definidos dois estados possíveis para cada dia, ou seja, seco ou chuvoso. Dessa forma, o modelo da Cadeia de Markov considera que a probabilidade

de um dia específico ser chuvoso é condicionada somente pela ocorrência de chuva, ou não, nos dias anteriores ou subsequentes. Conhecendo estas probabilidades de transição, e usando um gerador de números aleatórios, o modelo estocástico pode determinar séries de dias secos e chuvosos.

Para os dias de chuva, é preciso também gerar o valor da precipitação. Para isto, usualmente é ajustada uma distribuição estatística aos valores observados no local de interesse. Assim, os parâmetros do modelo de geração de chuva diária serão as probabilidades de transição da Cadeia de Markov e os parâmetros da distribuição ajustada aos valores de precipitação. Finalmente, estes parâmetros podem ser modificados condicionalmente, em função do intervalo da previsão climática (mensal ou sazonal), para gerar seqüências que sejam consistentes com as observações históricas. Esse processo de geração de séries diárias de precipitação é freqüentemente conhecido como desagregação estocástica (Glasbey et al., 1995; IRI, 2004a; Kottegoda et al., 2003).

Metodologias bastante simples podem ser empregadas para a desagregação diária, tal como no trabalho de Wood et al. (2002), onde o total mensal é distribuído segundo a seqüência diária (de um mesmo mês) do histórico observado, definido de forma aleatória. Outra técnica bastante comum é escolher um conjunto de anos do passado, cujos valores de um dado mês sejam similares ao mês que está sendo previsto, e para cada ano escolhido atribui-se a mesma probabilidade de ocorrência. Pode-se então utilizar a média dessa amostra ou ajustar uma distribuição de probabilidades para definir cenários prováveis de ocorrência (Hansen e Indeje, 2004).

O método baseado na seleção de anos similares do passado pode ainda ser melhorado, baseando-se na suposição que alguns anos, da amostra do passado, são mais prováveis de ocorrer do que os demais, possibilitando assumir pesos a cada um deles, no ajuste da distribuição de probabilidades. Uma técnica que têm sido empregada com essa finalidade, está baseada na estimativa da função de densidade de probabilidade pelo método *k-nearest neighbor* (*k-nn*), apresentado por Silverman (1999), que não requer assumir uma determinada função de probabilidade (Normal, Gama, etc.) para ajuste dos dados. Esse método foi adaptado por Lall e Sharma (1996), para emprego em conjunto com a técnica de Cadeias de Markov e foi aplicado com sucesso em diferentes trabalhos (Hansen e Indeje, 2004; Kumar et al., 2000; Rajagopalan e Lall, 1999; Souza Filho e Lall, 2003). Suas principais vantagens estão ligadas à não-linearidade e ao reduzido número de parâmetros, que facilitam a aplicação em casos com multi-variáveis e existência de correlação espacial.

4.2 Proposta Metodológica de Previsão Hidroclimática

Atualmente, a metodologia utilizada pelo ONS está baseada na previsões de modelos estocásticos vazão – vazão, conforme mostrado esquematicamente na Figura 4.3. É utilizada uma cadeia de modelos, que visa operar o sistema hidrelétrico para o horizonte de alguns dias, seis semanas e 12 meses a frente. Como dado de entrada aos modelos, são usadas séries de vazões reconstruídas sem o efeito de alterações antrópicas, como reservatórios e usos consuntivos. Estas vazões são denominadas de naturais e compreendem o período de 1931 a 2001.

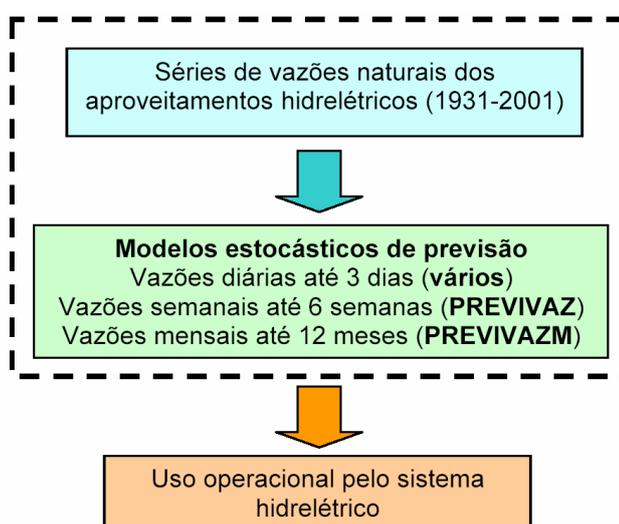


Figura 4.3: Esquemas da metodologia atualmente empregada nas previsões de vazão do ONS

Para previsões de vazões mensais, de até 12 meses a frente, é usado o modelo PREVIVAZM (Costa et al., 2003). Para previsões semanais de até 6 semanas o modelo é denominado PREVIVAZ, e as previsões diárias são realizadas de forma independente pela empresa de cada usina do sistema (ONS, 2000, 2001a, 2001b, 2004).

A metodologia proposta apresenta as vantagens de incluir a chuva observada até o início da previsão e a previsão de chuva a partir deste instante. Além da integração dos modelos atmosféricos e hidrológicos, é explorada a combinação de duas metodologias tradicionais de previsão hidrológica: modelos conceituais chuva - vazão e modelos estocásticos. Assim, a previsão realizada é o resultado da combinação de três modelos. O modelo atmosférico, que prevê o comportamento da precipitação, tanto a quantidade quanto a variabilidade espaço-temporal, um modelo hidrológico que descreve a estrutura física da

bacia em termos da topografia, vegetação e sistema de drenagem e um terceiro modelo, que é aplicado sobre os resultados do segundo, e que descreve o comportamento estatísticos das diferenças verificadas no passado, entre a vazão observada e a vazão estimada a partir do modelo chuva-vazão, reduzindo o seu erro no futuro.

Para as previsões de longo prazo, de acordo com a Figura 4.4a, a partir das informações climáticas atuais, o modelo atmosférico global fornece previsões climáticas de precipitação e demais variáveis atmosféricas. Estas previsões do modelo global são utilizadas como condições de contorno do modelo regional, que irá fornecer previsões de precipitação com maior resolução espacial. As previsões são geradas em valores totais diários.

Antes de serem usadas como entrada no modelo hidrológico, as previsões de precipitação, seja do modelo global ou regional, passam por um processo de correção de erros sistemáticos, através da técnica das curvas de probabilidade dos valores acumulados mensais. Em seguida, pode-se ainda, efetuar uma correção da distribuição temporal dos valores diários da precipitação ao longo do mês (ou trimestre, semestre, ...), através de um modelo de redistribuição temporal. Para essa pesquisa é testada a técnica mais simples de redistribuição, que consiste em substituir os valores diários de um mês (ou trimestre, semestre, ...) previsto por correspondentes valores diários de um mês (ou trimestre, semestre, ...) observado no passado, escolhido pela proximidade do valor total acumulado.

Uma vez efetuadas as correções na precipitação prevista, a mesma é inserida como dado de entrada do modelo hidrológico MGB-IPH, em valores totais diários, e o mesmo gera as previsões de vazão em valores médios diários, para até 6 meses no futuro. Em seqüência, com base nos valores observados e previstos de períodos anteriores, é aplicado o modelo estocástico de previsão dos resíduos, sobre os valores médios mensais da vazão prevista. Finalmente, obtém-se a previsão de vazões mensais somando-se a vazão gerada pelo modelo hidrológico (Q_{prev}) com os resíduos estimados (E), ou seja, $Q_{corr} = Q_{prev} + E$.

A previsão de longo prazo é realizada com periodicidade mensal e, no início de cada previsão, são atualizadas as variáveis de estado do modelo hidrológico e os parâmetros do modelo de resíduos, com base nas vazões observadas até a data atual.

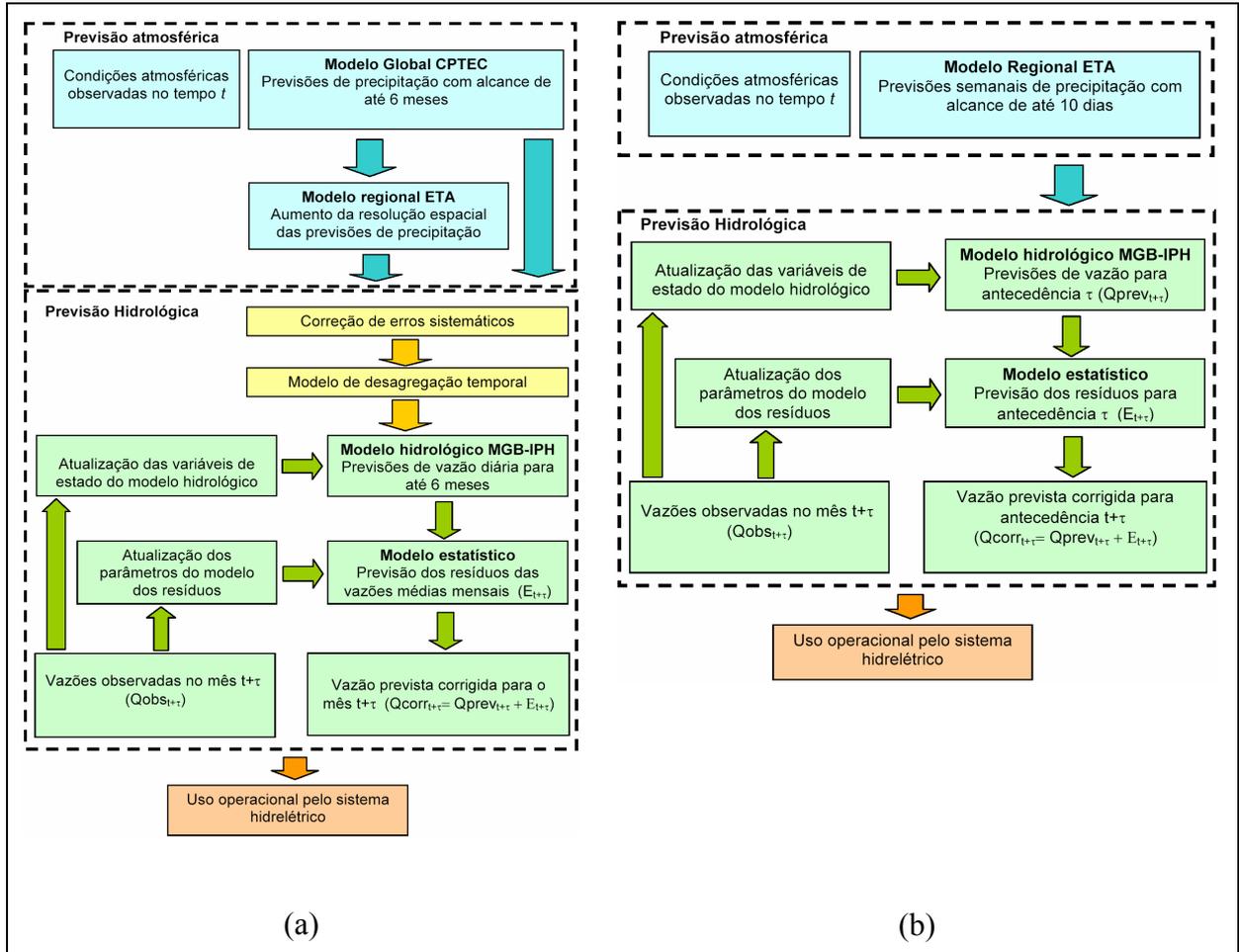


Figura 4.4: Estrutura metodológica para previsões de vazão de: (a) longo prazo; (b) curto prazo

Para a previsão de curto prazo, a estrutura metodológica é bastante semelhante, conforme mostrado na Figura 4.4b. As diferenças são que neste caso serão usadas apenas as previsões do modelo regional ETA, sem que sejam feitas correções na precipitação prevista. As previsões são realizadas com periodicidade semanal e o modelo de resíduos será aplicado sobre os valores médios semanais.

O estudo de caso será realizado na bacia do rio São Francisco que, por suas questões estratégicas tem os seguintes interesses: *a)* a previsibilidade climática é variável; *b)* não existe um modelo que simulação o conjunto da bacia; *c)* a dimensão e variabilidade física (área de aproximadamente 639.000 km²); *d)* engloba uma região de do sistema elétrico brasileiro; *e)* a disponibilidade de previsões atmosférica de dois modelos, um global e um regional.

4.2.1 Modelos e períodos de previsão

Em razão de recentes trabalhos de cooperação entre o IPH/UFRGS, CPTEC/INPE e IAG/USP (Tucci et al., 2003), os modelos de previsão utilizados foram os seguintes:

- Modelo Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC (Marengo et al., 2003);
- Modelo atmosférico regional ETA (CPTEC, 2005b);
- Modelo hidrológico MGB-IPH (Collischonn, 2001).

O modelo global do CPTEC forneceu previsões com um conjunto de 5 membros, para o período compreendido entre outubro de 1997 e abril de 2003. A resolução do modelo é de aproximadamente 200 km e a previsão é feita para antecedência de 6 meses, com periodicidade mensal.

Para formação das previsões por conjunto foram utilizadas condições iniciais de TSM persistida, defasadas com intervalo de 24 horas entre elas. Todavia, ao invés de serem pós-processados somente as médias mensais dos resultados do modelo, como é feito habitualmente no esquema operacional do CPTEC, para esse trabalho foram pós-processados resultados a cada 6 horas, a partir da data da condição inicial, durante os cerca de oito meses e meio a frente para cada condição inicial, sendo cerca de dois meses e meio, a partir da data da condição inicial, de simulação do modelo e os seis meses consecutivos de previsão. Os objetivos de disponibilizar resultados a cada 6 horas são para um melhor monitoramento da variação diurna do escoamento, temperatura e precipitação, e para fornecer resultados com variação diurna para o modelo regional ETA.

Os resultados da previsão por conjuntos (5 membros) foram disponibilizados em forma digital em 15 níveis de pressão atmosférica: 1000, 925, 850, 775, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, e 30 hPa e num total de 25 variáveis previstas, entre elas: componente zonal do vento, componente meridional do vento, pressão reduzida ao nível médio do mar, temperatura da superfície, umidade relativa próxima à superfície, umidade do solo na superfície, precipitação total, entre outras. Estes resultados também foram utilizados como condições de contorno para o modelo regional ETA.

Para as previsões climáticas, o modelo regional ETA foi rodado com 40 km de resolução e 5 membros a partir de setembro de 1998 até agosto 2003, mas para obter previsões somente do período úmido da bacia, ou seja, dos meses de outubro a abril.

O modelo regional ETA também foi rodado com 40 km de resolução e 1 membro, para previsões com antecedência de 10 dias, no período dos anos de 1996 a 2003. As previsões têm periodicidade semanal, e seguem o calendário adotado nas previsões do ONS. Estas previsões foram cedidas pelo ONS, que no momento está coordenando uma pesquisa de previsão de vazões com base nessas previsões do ETA, em diversas bacias brasileiras e com diferentes tipos de modelos hidrológicos.

Modelo de previsão dos resíduos

O modelo estocástico dos resíduos está baseado nos modelos “função de transferência” (Makridakis et al., 1998) que relacionam um conjunto de variáveis de entrada (umidades nas camadas do solo, previsões da precipitação, ...) a uma variável de saída (vazão semanal natural), além dos resíduos das previsões anteriores.

Deve ser mencionado que modelos “função de transferência” têm sido usados para modelar a relação entre vazão e precipitação diretamente (isto é, substituindo o modelo distribuído), mas nesta pesquisa os modelos função de transferência são utilizados somente na modelação dos resíduos produzidos pelo modelo distribuído chuva-vazão.

Será testada a modelagem dos resíduos $E(t) = Q_{obs}(t) - Q_{prev}(t)$ diretamente, a partir de modelo da forma:

$$E(t) = a_1.E(t-1) + a_2.E(t-2) + \dots + \xi(t) \quad (4.1)$$

ou, mais geralmente, podem ser adicionadas outras variáveis explicativas, resultando em:

$$E(t) = a_1.E(t-1) + a_2.E(t-2) + \dots + b_1.P_{ETA}(t) + b_2.WCI(t-1) + \dots + \xi(t) \quad (4.2)$$

onde: $E(t)$ é o resíduo na semana t , para qual se está realizando a previsão; $P_{ETA}(t)$ é a precipitação prevista pelo modelo ETA para a semana t ; $WCI(t-1)$ é a umidade do solo no modelo hidrológico, antes do início da previsão, $a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$ são parâmetros do modelo; e $\xi(t)$ é um termo completamente aleatório.

O modelo da Equação 4.1 é uma autoregressão (porque as variáveis no lado direito são obtidas pela defasagem da variável no lado esquerdo) e o modelo da Equação 4.2 é um modelo de transferência, porque além dos termos autoregressivos, tem variáveis explicativas como P_{ETA} e WCI , também no lado direito.

Ou seja, o modelo estocástico de correção das previsões pode modificar as previsões originais do modelo hidrológico com base em coeficientes que dependem da chuva prevista, das condições iniciais de umidade do solo e do erro cometido nas semanas anteriores. As condições de umidade do solo introduzem uma componente sazonal importante no modelo, porque variam com a época do ano, como os próprios erros do modelo hidrológico. A componente autoregressiva introduz a possibilidade de corrigir erros sistemáticos que podem ser originados por modificações nas curvas-chave ou nos métodos de calcular a vazão, ou por modificações na bacia hidrográfica que não estarão sendo representadas pelos parâmetros do modelo hidrológico.

4.3 Resumo do Capítulo

Previsão hidroclimática de vazões utiliza as previsões de precipitação geradas por modelos atmosféricos, que são inseridas como variáveis de entrada em modelos hidrológicos. Esse tipo de previsão introduz informações climáticas atuais e suas relações globais, possibilitando antecipar um pouco mais o comportamento das precipitações sobre a bacia, permitindo a geração de previsões confiáveis de vazão para maiores antecedências.

Ainda são poucos os trabalhos que realmente acoplam os modelos atmosféricos e hidrológicos em modo *on-line*, com interação simultânea dos processos em ambos os sentidos, atmosfera-superfície e vice-versa. A grande maioria dos trabalhos de acoplamento dos modelos tem utilizado a metodologia *off-line*, onde somente o modelo atmosférico fornece informações ao modelo hidrológico.

A precipitação prevista por modelos numéricos deve, para a maioria dos casos, ser utilizada em associação com outras ferramentas, como correções estatísticas e adaptações regionais, para corrigir alguns erros antes dar entrada no modelo hidrológico como a distribuição espacial dos eventos, a distribuição temporal da precipitação e a intensidade da precipitação.

Em razão de recentes trabalhos de cooperação entre o IPH/UFRGS, CPTEC/INPE e IAG/USP, na proposta metodológica dessa pesquisa serão utilizados os seguintes modelos de previsão: Modelo Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC (previsão climática), o modelo atmosférico regional ETA do CPTEC/INPE (previsão climática e de tempo) e o modelo hidrológico MGB-IPH. O acoplamento entre os modelos será do tipo *off-line*. O estudo de caso será feito na bacia do rio São Francisco, por existirem previsões atmosféricas disponíveis no período de 1996 a 2003, e pelo fato da bacia ser de fundamental importância para uma grande região do Brasil.

Além dos modelos atmosférico e hidrológico, também será acoplado um modelo estocástico ao sistema de previsão, para realizar a estimativa dos resíduos da previsão hidroclimática. O modelo estocástico dos resíduos está baseado nos modelos função de transferência, que relacionam um conjunto de variáveis de entrada (umidades nas camadas do solo, previsões da precipitação, ...) a uma variável de saída (vazão semanal natural), além dos resíduos das previsões anteriores.

5 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

5.1 Bacia do Rio São Francisco: Descrição

A bacia do São Francisco possui uma área de 639.000 km² e seu curso principal tem uma extensão de 2.700 km entre as cabeceiras, na Serra da Canastra, em terras do município de São Roque de Minas (MG), e a foz, no Oceano Atlântico, entre os estados de Sergipe e Alagoas. A área da bacia corresponde a aproximadamente 8% do território nacional e abrange parte de seis estados e do distrito federal. Destaca-se ainda que a bacia compreende uma parte significativa do Polígono das Secas, que constitui um território reconhecido pela legislação como sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens e situa-se, majoritariamente, na região Nordeste, porém estende-se até o norte de Minas Gerais. A Figura 5.1 apresenta a bacia do São Francisco em relação ao território nacional e em relação à Região Nordeste e ao Polígono das Secas.

Tradicionalmente, a bacia está dividida em 4 regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco, conforme apresentado na Figura 5.2. As características principais dessas regiões são descritas a seguir, de acordo com CODEVASF (2000).

Alto São Francisco: Estende-se desde as cabeceiras, na Serra da Canastra, município de São Roque de Minas, até a cidade de Pirapora (MG), abrangendo as sub-bacias dos rios das Velhas, Pará e Indaiá, além das sub-bacias dos rios Abaeté a oeste e Jequitáí a leste, que conformam seu limite. Situa-se em Minas Gerais, abrangendo a Usina Hidrelétrica de Três Marias, e apresenta topografia ligeiramente acidentada, com serras e terrenos ondulados.

Médio São Francisco: Compreende o trecho desde Pirapora até a cidade de Remanso (BA), incluindo as sub-bacias dos afluentes Pilão Arcado a oeste, e do Jacaré a leste e, além dessas, as sub-bacias dos rios Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente, Grande, Verde Grande e

Paramirim, situando-se nos Estados de Minas Gerais e Bahia. Suas condições climáticas vão se tornando mais características de uma região tropical semi-árida.

Sub-médio São Francisco: Abrange áreas dos Estados da Bahia e Pernambuco, estende-se de Remanso até a cidade de Paulo Afonso (BA), e inclui as sub-bacias dos rios Pajeú, Tourão e Vargem, além da sub-bacia do rio Moxotó, último afluente da margem esquerda.

Baixo São Francisco: Estende-se de Paulo Afonso à foz, no Oceano Atlântico, compreendendo as sub-bacias dos rios Ipanema e Capivara. Situa-se em áreas dos estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas.

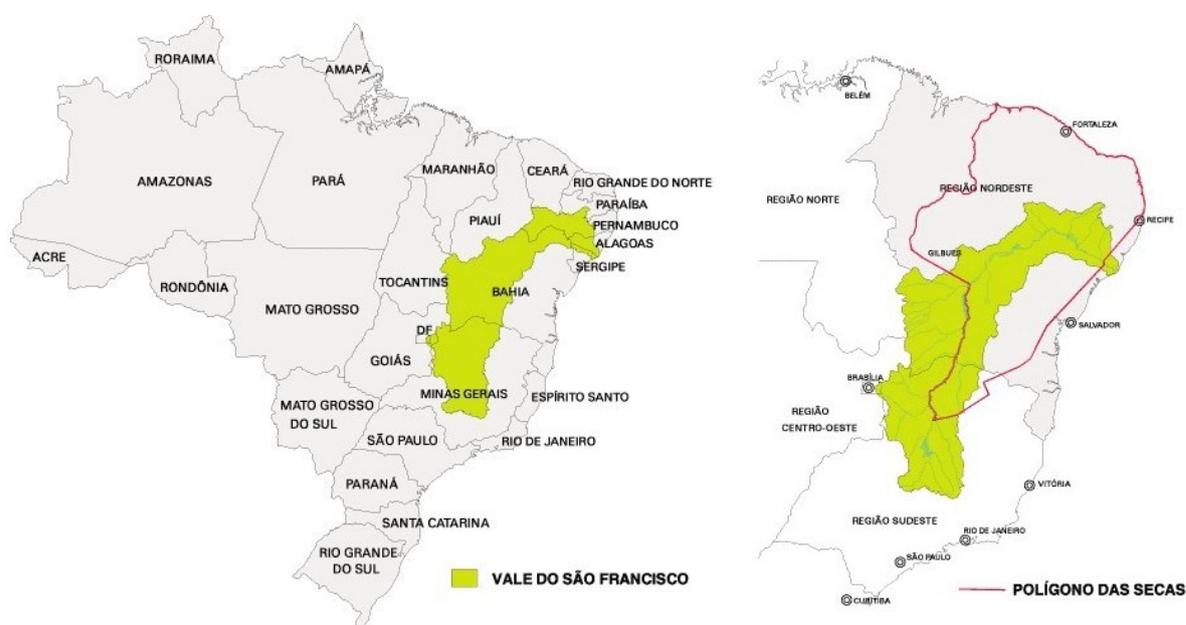


Figura 5.1: Localização geográfica da bacia do São Francisco (CODEVASF, 2000)

As maiores declividades no curso principal do São Francisco são encontradas nas cabeceiras e nas proximidades da foz, e são nesses trechos que estão localizados os principais aproveitamentos (Figura 5.2). Nos primeiros 120 km há um desnível de 600 m; nos seguintes 360 km, até Três Marias, outros 230 m. Daí até Sobradinho, em 1.416 km, o rio desce 150 m. No trecho entre a usina hidrelétrica (UHE) de Itaparica e a UHE Xingó há um desnível de aproximadamente 230 m, esse é o trecho das grandes quedas. Daí em diante, segue em baixa declividade até o oceano Atlântico. No total, há uma diferença de 1.350 m entre as cabeceiras e a foz. No ANEXO A são apresentados os dados dos principais aproveitamentos hidrelétricos da bacia.

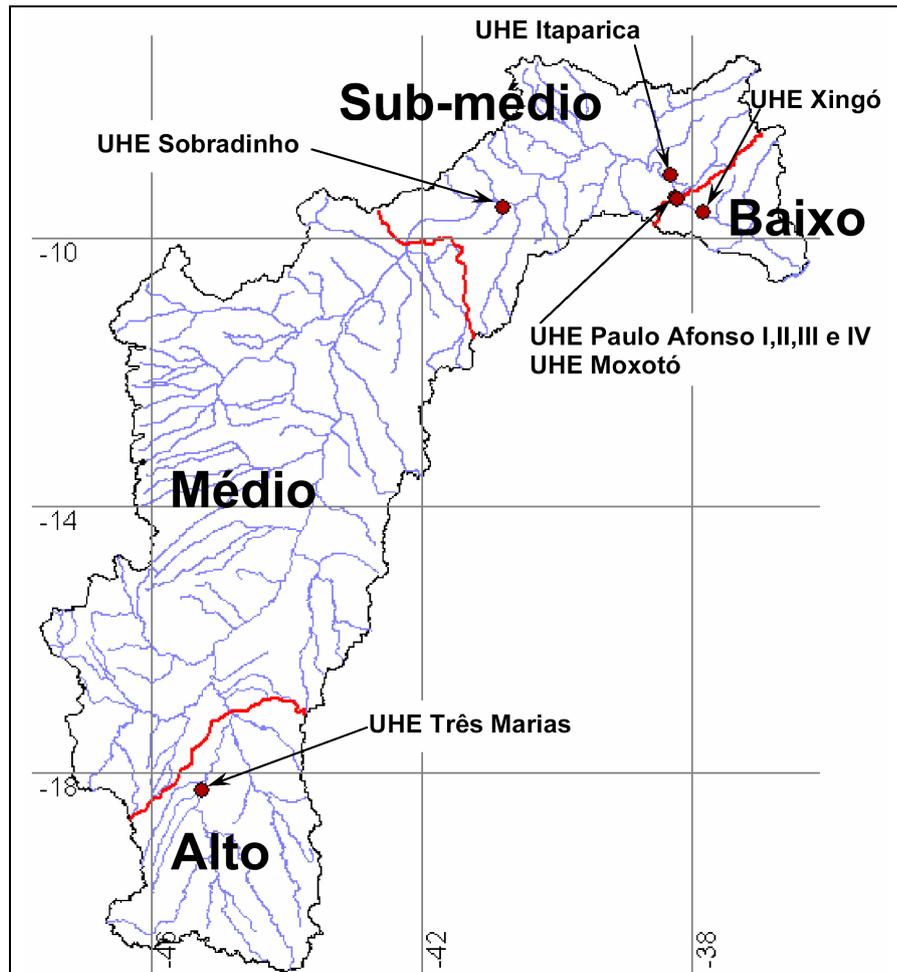


Figura 5.2: Regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco e localização dos principais aproveitamentos hidrelétricos.

Em função da topologia do sistema e das características físicas da bacia, os reservatórios de Três Marias e Sobradinho operam para controle de cheias de forma independente, visando atender somente suas respectivas restrições. Isto ocorre pela grande distância entre as duas usinas, aproximadamente 1.400 km, de maneira que a água liberada em Três Marias atinge o reservatório de Sobradinho após um período de 15 a 35 dias, dependendo da magnitude das vazões (ONS, 2001c).

5.1.1 Características climáticas

O clima regional apresenta uma variabilidade associada à transição do úmido para o árido, com temperatura média anual variando de 18° a 27°C e, ainda, um baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação solar. Os fenômenos El Niño e La Niña

interferem sensivelmente no clima da região, proporcionando períodos de secas e períodos úmidos com frequência irregular. A precipitação apresenta média anual de 1.036 mm, sendo os mais altos valores na ordem de 1.400 mm – verificados nas nascentes do rio São Francisco e os mais baixos – cerca de 350 mm –, entre Sento Sé (BA) e Paulo Afonso (BA).

Em relação às contribuições percentuais de chuva de cada estação em relação ao total anual observa-se que em out/nov/dez e jan/fev/mar há a maior contribuição na parte alta da bacia, com máximos no início do verão. Já na parte baixa da bacia e litoral os maiores totais são observados em mar/abr/mai e abr/mai/jun, com valores que ultrapassam os 50% de contribuição em relação ao total anual (Sampaio e Marengo, 2003).

A existência de diferentes regimes de precipitação em distintas regiões da bacia indica que mais de um mecanismo dinâmico é responsável pela ocorrência de chuva. Na bacia alta as chuvas de verão acontecem devido à incursão de frentes frias de verão e da presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que é mais intensa em dez/jan/fev, e na bacia baixa e litoral a ocorrência de chuva se dá, principalmente, em razão da presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que nesta época do ano localiza-se mais ao sul, determinando a estação chuvosa nesta região do semi-árido assim como no norte do Nordeste. A ação de distúrbios de leste também contribui para esse máximo de chuva.

A evapotranspiração média é de 896 mm/ano, apresentando valores elevados em toda região: entre 1.400 mm (verificada no Sub-médio São Francisco) e 840 mm (no Alto). Os altos valores de evapotranspiração observados na região são função basicamente das elevadas temperaturas, da localização geográfica intertropical e da reduzida nebulosidade na maior parte do ano. A elevada evapotranspiração potencial, na maioria das vezes não compensada pelas chuvas, faz com sejam observados na região altos valores de déficit hídrico nos solos.

5.1.2 Simulações do Rio São Francisco: antecedentes

A simulação e/ou previsão de vazões na bacia do rio São Francisco pode ser feita para atender a diferentes demandas. Além da previsão de afluência aos reservatórios de geração de energia, as simulações do rio São Francisco são úteis, por exemplo, para a navegação, prevenção de cheias e irrigação.

Em termos de enchentes, estas ocorrem com maior frequência nos afluentes, principalmente no trecho do Alto São Francisco, condicionadas pelo padrão de chuvas e

relevo da região. São registradas inundações regulares nos rios Pará, Paraopeba, das Velhas e Jequitaiá. Muitas vezes, a combinação de cheias nos afluentes provoca cheias importantes também no curso principal do rio São Francisco, afetando cidades ribeirinhas como Pirapora, Januária, Manga, Itacarambi e Bom Jesus da Lapa. Por isso, muitas dessas cidades possuem diques de proteção contra cheias. Na grande cheia do verão de 1978/79, praticamente todas as cidades situadas na margem do rio São Francisco e de seus afluentes foram seriamente atingidas, com perdas humanas e materiais significativas. Toda a malha rodoviária e ferroviária no estado de Minas Gerais foi afetada, isolando grandes cidades, como Montes Claros, do restante do estado por alguns dias.

Em relação aos eventos de estiagem, é notável o período úmido de 2000/2001, quando as vazões observadas no rio São Francisco foram muito abaixo da média histórica, obrigando o reservatório de Sobradinho a operar com níveis excessivamente reduzidos. Após esse evento, o setor elétrico passou a considerar o verão de 200/2001 como parte do período crítico da bacia, e não mais os anos da década de 1950.

Portanto, em razão desses eventos históricos recentes, e somando-se o crescimento acelerado dos usos na bacia ao longo da última década, as simulações do rio São Francisco ganharam forte interesse econômico e social.

Cirilo (1991) aplicou um modelo de hidrodinâmico para propagação de vazões ao longo do curso principal, entre a usina de Três Marias e a Foz. No total foram simulados 1605 km, incluindo o amortecimento nos reservatórios.

Uma das maiores dificuldades na simulação do rio São Francisco se refere ao trecho entre as usinas de Três Marias e Sobradinho, que é navegável e possui cerca de 1400 km. Neste trecho, as maiores cheias sofrem forte influência das planícies de inundação, que possuem largura variável e formam-se lagoas onde as águas ficam retidas durante a vazante. No trabalho de Cirilo (1991), as larguras foram estimadas usando imagens de satélite Landsat IV. Metodologia semelhante foi empregada por Pinheiro (2000), que usou um modelo hidrodinâmico para simular o rio São Francisco entre os postos Pirapora e São Francisco, com objetivo de gerar subsídios para auxílio à navegação no trecho. Em ambos os casos, a estimativa da planície lateral permitiu obter resultados bastante satisfatórios nas simulações.

Tucci (1998) aplicou o método Muskingum no trecho entre os postos São Romão e Manga, obtendo bons resultados para eventos que não extravasam da calha principal. Silveira (1996) utilizou um modelo de diferenças para realizar previsões de vazão afluente ao

reservatório de Sobradinho e atualmente o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) utiliza o modelo *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation* (SSARR) para propagar vazões entre Três Marias e Sobradinho, com objetivos de previsão de vazões para geração de energia (ONS, 2001a). Os resultados desses trabalhos têm sido muito bons, devido ao longo tempo de propagação das vazões nesse trecho, que pode alcançar mais de 30 dias.

Em relação a modelo do tipo chuva-vazão, recentemente Pinto (2005) aplicou um modelo de simulação mensal para simulação das bacias do Alto São Francisco, com objetivos de previsão de vazão de longo prazo, obtendo bons resultados. De acordo com Cirilo (2005) o modelo chuva vazão IPH2 foi aplicado ao Alto São Francisco com resultados muito bons, mesmo sendo um modelo do tipo concentrado desenvolvido para pequenas bacias. Estes resultados mostram que a região do Alto São Francisco, onde é gerada a maior parcela das vazões da bacia, responde muito bem aos modelos hidrológicos. Portanto, as maiores dificuldades de simulação estão no trecho do rio São Francisco entre Três Marias e Sobradinho e nas bacias da região semi-árida.

5.2 Dados hidrológicos e Meteorológicos

Os dados hidrológicos e meteorológicos necessários para o desenvolvimento da pesquisa, particularmente para a aplicação do modelo hidrológico, incluem dados de vazão, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar. Os dados utilizados são descritos a seguir, e foram obtidos da rede hidrométrica da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e Agência Nacional de Águas - ANA.

5.2.1 Séries de vazão

Os dados de vazão incluem dados de vazão observada em postos fluviométricos, dados de vazão defluente de aproveitamentos hidroelétricos e dados de vazões naturais nos aproveitamentos hidrelétricos. As séries de vazão observada correspondem a dados medidos diretamente nos postos fluviométricos e apresentam a influência da operação dos reservatórios, já as séries de vazões naturais correspondem a dados que não são medidos diretamente, mas são calculados a partir dos dados observados e das informações sobre a

operação de reservatórios e sobre as retiradas de água para usos consuntivos. As séries de vazão natural correspondem aos dados de vazão que seriam observados nos locais dos barramentos, se não existissem os aproveitamentos hidrelétricos e os usos consuntivos.

Vazões observadas

Os dados de vazões observadas são utilizados para a calibração do modelo hidrológico, especialmente em sub-bacias de afluentes ao rio São Francisco em que não existem aproveitamentos hidrelétricos, e para verificar os resultados em locais diferentes ao longo do rio principal.

Para seleção dos postos fluviométricos adotou-se o critério preliminar de escolher os postos com área de drenagem maior ou igual a 4.000 km², em função da grande extensão da bacia e pelo fato do modelo hidrológico apresentar melhor resposta quanto maior for a dimensão da bacia (Collischonn e Tucci, 2001).

Inicialmente foram identificados 122 postos fluviométricos com dados de vazão na bacia. Através de uma análise gráfica identificou-se que a partir de 1977 as séries apresentam maior homogeneidade e considerando que a cheia de 1978/79 constitui um evento de referência na bacia e que ocorreram outras cheias posteriormente (Pinheiro, 2001; Silveira, 1996), adotou-se que as previsões serão realizadas no período a partir de 1977, incluindo as fases de calibração e verificação do modelo hidrológico. Com isso, dos 122 postos analisados inicialmente, foram eliminados 27, por deficiências das séries no período escolhido, restando os 95 postos apresentados na Figura 5.3a.

Vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos

As séries de vazões naturais são utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema Hidrelétrico (ONS) para realizar previsões de vazão nos reservatórios das usinas que compõem o SIN e, com o auxílio destas previsões, planeja-se a operação de todo o sistema.

As séries são de médias diárias e abrangem o período de 1931 a 2001, para todos os aproveitamentos. Nestas séries são retirados os efeitos dos usos consuntivos e os efeitos provocados pela operação dos reservatórios, e preenchem-se os valores faltantes em todo período. Estas séries foram utilizadas durante a fase de calibração e validação do modelo hidrológico, de maneira que não foi necessário simular a operação dos reservatórios. Foram utilizadas as vazões naturais das usinas: Queimado, Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Xingó e complexo Moxotó/Paulo Afonso.

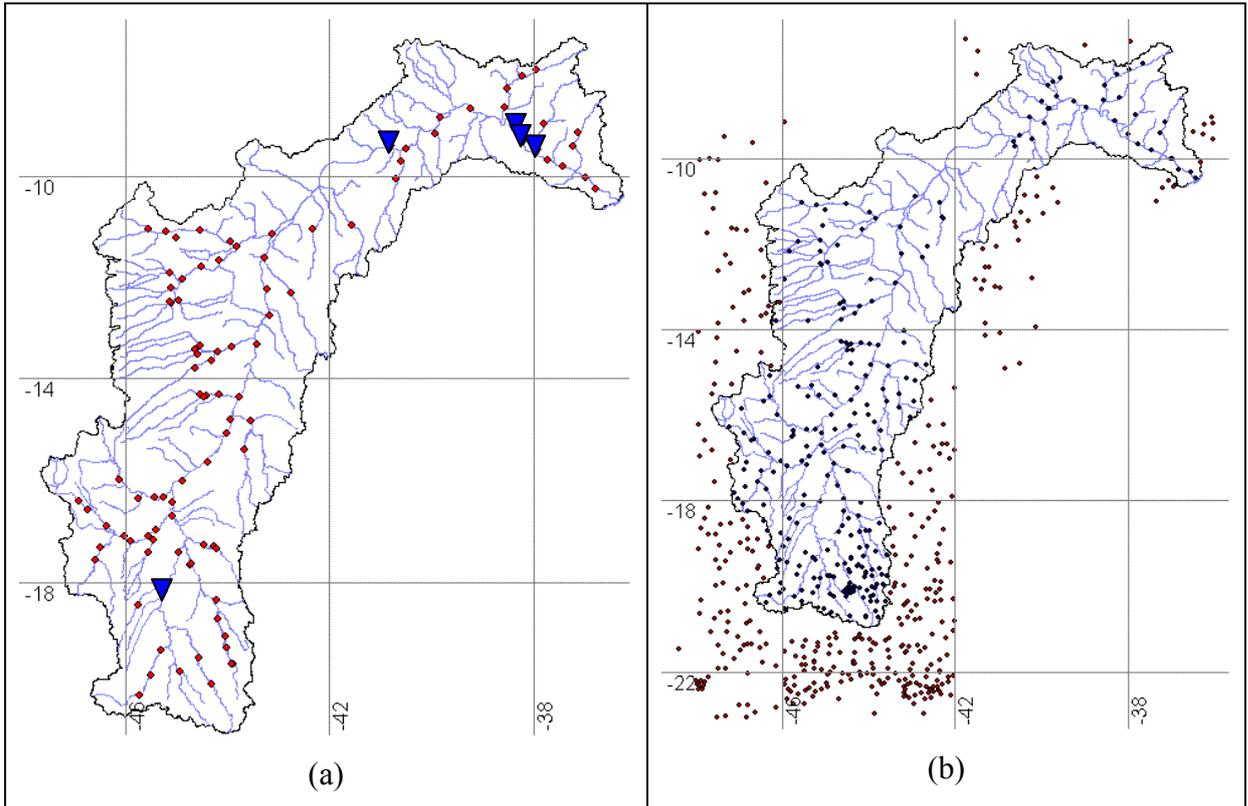


Figura 5.3: Localização dos postos hidrométricos na bacia do rio São Francisco: (a) postos fluviométricos (triângulos são usinas hidrelétricas); (b) postos pluviométricos

Vazões afluentes e defluentes dos reservatórios hidrelétricos

Através da ANEEL foram obtidas as séries de vazões defluentes dos principais reservatórios hidrelétricos da bacia. Estas séries correspondem à vazão total observada na saída dos aproveitamentos, ou seja, a vazão extravasada pelos vertedores somada com a vazão turbinada. Além disso, também foram obtidas séries de vazões afluentes aos reservatórios hidrelétricos, que correspondem aos valores de vazão afluentes estimados pelo balanço hídrico invertido dos reservatórios.

Estes dados serão utilizados complementarmente aos dados de vazões observadas nos postos fluviométricos e aos dados de vazão natural para as etapas de calibração e verificação do modelo hidrológico.

5.2.2 Séries de precipitação e variáveis meteorológicas

Para seleção dos postos pluviométricos adotou-se um procedimento análogo aos fluviométricos. Inicialmente foram identificados 350 postos com dados, pertencentes à rede pluviométrica da ANA, dentro dos limites da bacia. Verificou-se que 122 postos possuem

séries com falhas excessivas no período de 1977 a 2001 e foram descartados. Portanto, resultaram 228 postos pluviométricos usados no ajuste do modelo hidrológico. Adicionalmente foram selecionados 357 postos pluviométricos localizados fora dos limites da bacia, necessários para as comparações com os resultados do modelo climático global. Na Figura 5.3b é apresentada a localização de todos os postos pluviométricos usados ao longo da pesquisa.

Para complementar os dados pluviométricos na bacia, foram obtidos dados de precipitação de 26 estações meteorológicas com dados históricos mensais. Além de informações de precipitação, as estações meteorológicas possuem registros de variáveis como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica, e radiação solar ou insolação.

5.3 Classificação dos Tipos de Solos

Pode-se, genericamente, dividir a ocorrência dos solos da bacia em três zonas básicas, que estão intimamente relacionadas com o clima, rocha matriz, vegetação e relevo (CODEVASF, 2003). Na zona compreendida entre as cabeceiras do São Francisco até Santa Maria da Boa Vista, pela margem esquerda, e Juazeiro, pela margem direita, há uma predominância absoluta de latossolos e podzólicos. Verifica-se, ainda, a ocorrência de areias quartzosas, cambissolos e litossolos, sendo estes dois últimos mais expressivos ao sul desta zona e nas áreas montanhosas do trecho mineiro.

A partir daqueles limites até Porto Real do Colégio, verifica-se uma mudança brusca dos solos e da geologia. Na margem esquerda, as manchas de solos são mais uniformes e apresentam menor número de grandes grupos, predominando os brunos não cálcicos, regossolos, litossolos, areias quartzosas e, somente após Paulo Afonso, grandes manchas de planossolos. Na margem direita, as manchas são entrecortadas entre si e menores, ocorrendo, principalmente, planossolos, areias quartzosas, brunos não cálcicos, litossolos, podzólicos, vertissolos, cambissolos e solonetz solodizados.

No curso inferior do rio, tem-se nova fisiografia e diferentes potenciais em recursos de solos. Neste trecho predominam os podzólicos, latossolos, litossolos, areias quartzosas, podzólicos e os hidromórficos. Os solos agricultáveis desta zona são os latossolos, podzólicos e hidromórficos. Os latossolos e os podzólicos se situam em tabuleiros elevados, limitando a

implantação da agricultura irrigada. Os hidromórficos, situados em várzeas inundáveis, se constituem no maior potencial agrícola do Baixo São Francisco, excetuando-se as unidades que apresentam problemas químicos.

Para geração de um mapa de solos da bacia, adequado ao modelo hidrológico, foram utilizados os levantamentos do projeto RADAM Brasil e um mapa de solos fornecidos pela ANEEL em arquivo digital, produzido pela CODEVASF em escala 1:1.000.000. A classificação original foi refeita, com o objetivo de agrupar aqueles solos que apresentam características hidrológicas semelhantes.

Devido à grande variedade de solos encontrados, procurou-se agrupar os tipos de solos que apresentam características físicas semelhantes, sob o ponto de vista do comportamento hidrológico. As características consideradas para agrupar os diferentes tipos de solos foram: profundidade, capacidade de drenagem, textura e tipo de relevo. Tais características condicionam fortemente o comportamento hidrológico da bacia, pois refletem a maior ou menor capacidade de armazenamento de água e a aptidão do solo em produzir escoamento superficial e/ou subterrâneo.

No primeiro grupo estão todos Latossolos, que se caracterizam por serem profundos, de textura argilosa e com acentuada capacidade de drenagem, características que propiciam uma grande capacidade de armazenamento de água. Além disso, ocorrem em terrenos planos ou suavemente ondulados, favorecendo a mecanização agrícola.

No terceiro grupo estão solos de textura arenosa, muito profundos e, conseqüentemente, com grande capacidade de drenagem e armazenamento de água. Incluem-se neste grupo as Areias Quartzosas e os Regossolos.

O grupo quatro abrange solos profundos, porém de drenagem imperfeita e com o lençol freático se mantendo próximo da superfície. Ocorrem tipicamente junto as planícies de inundação dos principais cursos d'água. Neste grupo foram inseridos os solos Aluviais, Areias Quartzosas Hidromórficas e o Podzol.

O segundo grupo inclui os solos Podzólicos, cuja profundidade pode variar de raso a profundo, porém com menor profundidade dos que os Latossolos. A textura é argilosa e a capacidade de drenagem é de boa a moderada, o que lhes confere menor capacidade de armazenamento do que os Latossolos.

O Cambissolo foi classificado como o grupo 5, pois esse solo abrange uma porcentagem importante da área da bacia, principalmente no Alto São Francisco. São solos que variam de rasos a profundos, de textura arenosa com pedregosidade e moderadamente drenados. Ocorrem normalmente em terrenos montanhosos.

Os solos Litólicos também foram classificados em separado, formando o grupo 6. São solos de forte influência no comportamento hidrológico pois são, em geral, os que mais facilmente produzem escoamento superficial. Isto porque são solos rasos, muito bem drenados e ocorrem em terrenos de relevo montanhoso, distribuídos por toda bacia.

No sétimo grupo foram incluídos solos com características de pequena profundidade, textura argilosa e drenagem imperfeita. Ocorrem em terrenos planos e, normalmente, apresentam excesso de umidade durante o período chuvoso e no período de estiagem tornam-se secos excessivamente duros. São típicos da região semi-árida e Baixo São Francisco. Neste grupo foram inseridos os Brunos Não-cálcicos, Planossolos, Solos Halomórficos, Vertissolos e os solos Hidromórficos Gleizados.

O oitavo grupo é constituído pelos Afloramentos Rochosos, que são formados por exposições de diferentes tipos de rochas. Ocorrem geralmente associados a solos Litólicos e/ou Cambissolos. Ocorrem em terrenos montanhosos do Alto São Francisco e são importantes por produzirem bastante escoamento superficial.

O mapa com a classificação dos grupos de solos na bacia é apresentada na Figura 5.4 e na Tabela 5.1 são apresentadas as proporções da área total, ocupadas por cada um dos grupos de solos definidos neste item.

Tabela 5.1: Área ocupada pelos principais grupos de solos na bacia do São Francisco

Grupo	Nome	Área (%)
1	Latossolos	37,93
2	Podzólicos	10,65
3	Regossolos e Areias Quartzosas	16,40
4	Aluviais, Areias Quartzosas Hidromórficas e Podzol	2,17
5	Cambissolos	11,96
6	Litólicos	12,45
7	Brunos Não-cálcico, Planossolos, Halomórficos, Vertissolos e Hidromórficos Gleizados	7,24
8	Afloramentos Rochosos	0,16
9	Água	1,03

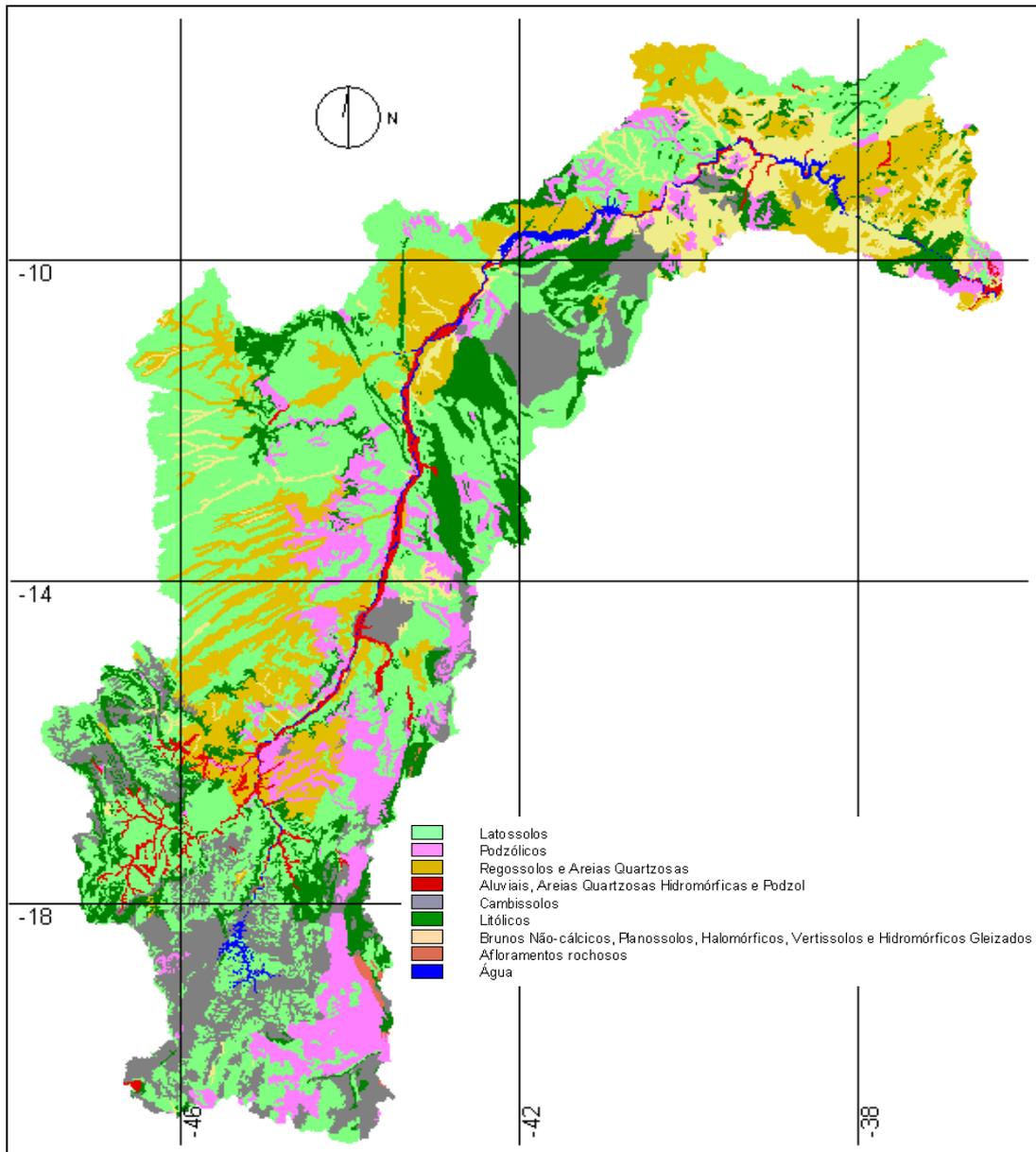


Figura 5.4: Grupos de solos considerados na modelagem da bacia do rio São Francisco

5.4 Classes de uso do solo e cobertura vegetal

O objetivo deste item é definir os grupos de uso e ocupação do solo que, posteriormente, serão combinados com os grupos de tipos de solo, para gerar os blocos com os quais são subdivididas as células do modelo hidrológico distribuído.

Foram obtidas imagens de satélite Landsat TM e ETM, de resolução 30 m, obtidas a partir do banco de dados *Global Land Cover Facility* da Universidade de Maryland

(disponível em <<http://glcf.umiacs.umd.edu>>). Foram coletadas imagens de toda extensão da bacia, totalizando 39 cenas com datas entre 1986 e 2001. A Figura 5.5 apresenta a articulação das mesmas em relação a bacia do São Francisco.

De forma análoga aos tipos de solo, o uso e cobertura vegetal na bacia é bastante variado e, para aplicação do modelo hidrológico, não é necessária uma classificação detalhada da cobertura, ou seja, procurou-se agrupar as classes que apresentam características físicas semelhantes, sob o ponto de vista hidrológico.

Dessa forma, após análise preliminar das composições coloridas, análise dos mapas do projeto RADAM Brasil e informações dos trabalhos de Junqueira e Rosa (2002), Junqueira (2000) e Junqueira (2002), optou-se por utilizar as seguintes classes de uso do solo e cobertura vegetal:

- a) *Pastagem/Agricultura*. Nesta classe foram agrupadas áreas de agricultura e de pastagem por apresentarem características semelhantes em termos de porte físico, profundidade de raízes e características de transpiração. Pelo mesmo motivo também se inserem nesta classe o campo limpo e rupestre, que se constituem de pastagens naturais, com poucos arbustos e ausência de árvores;
- b) *Agricultura Irrigada*. Compreendem áreas ocupadas culturas irrigadas de diversas variedades;
- c) *Cerrado/Cerradão*. Engloba os dois tipos de cerrado;
- d) *Área Degradada*. Correspondem às áreas com ocorrência de processos de erosão, mineração ou desgaste por excesso de pastoreio, onde o solo se encontra exposto;
- e) *Reflorestamento*. Classe que representa áreas reflorestadas com eucaliptos e pinus, que na maioria dos casos se destina a exploração de carvão vegetal;
- f) *Floresta*. Áreas com vegetação predominante de árvores de grande porte;
- g) *Caatinga*. Classe que engloba todos os tipos de caatinga encontrados na bacia;
- h) *Água*. Corresponde aos rios, lagos, lagoas e represas.

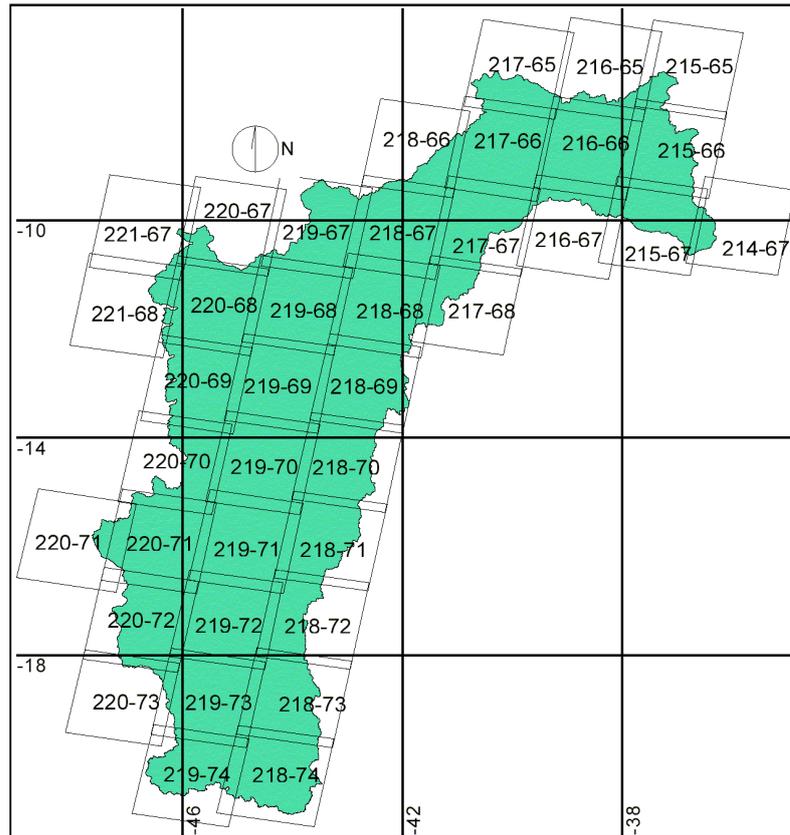


Figura 5.5: Articulação das imagens de satélite utilizadas para a bacia do São Francisco

Embora a classificação multiespectral seja eficiente na identificação das coberturas, foi necessário recorrer à edição manual, em tela, para efetuar correções nas imagens classificadas. Essa edição é especialmente importante em áreas de conflito, onde “pixeis” de classes diferentes se confundem, pelas semelhanças no padrão da resposta espectral.

Nas imagens de satélite, a resposta espectral dos cultivos irrigados se confunde com coberturas como pasto, reflorestamento e florestas, porém grande parte dos perímetros de irrigação utilizam equipamentos do tipo pivô central. Isto gera uma área circular bem definida nas imagens de satélite, permitindo separar a irrigação de forma precisa. Para auxiliar na identificação das áreas de agricultura irrigada, que não usam o pivô central, foi utilizado um mapa de irrigação elaborado pela CODEVASF, cedido pela ANEEL. Esse mapa foi sobreposto às imagens de satélite e, desta forma foram definidas as áreas de irrigação, não identificadas na classificação multiespectral. Na Figura 5.6 é mostrada uma composição da imagem de satélite com o mapa de irrigação para região das cidades de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE), onde existem extensas áreas de agricultura irrigada.

Na Figura 5.7 pode-se observar a classificação obtida para toda bacia, após a junção das 39 imagens utilizadas. Na Tabela 5.2 são apresentadas as proporções da área total da

bacia, ocupadas por cada uma das 8 classes de uso e cobertura vegetal definidos neste trabalho.

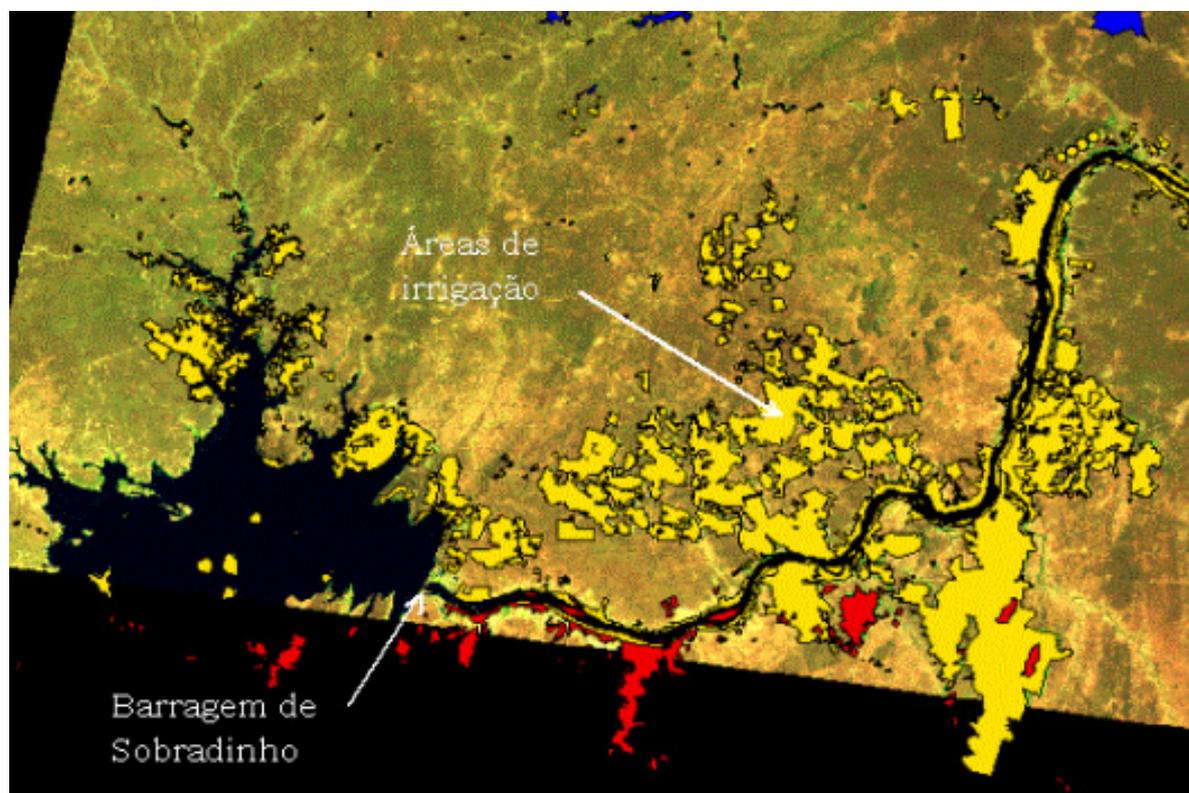


Figura 5.6: Mapa de áreas irrigadas (polígonos amarelos) sobreposto à imagem de satélite na região de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE).

Tabela 5.2: Porcentagem de área ocupada pelos principais classes de uso e cobertura do solo na bacia do São Francisco

Número	Classe	Área (%)
1	Pastagem/Agricultura	40,1
2	Agricultura Irrigada	0,7
3	Cerrado	26,2
4	Área degradada	1,4
5	Reflorestamento	0,6
6	Floresta	0,7
7	Caatinga	29,3
8	Água	1,0

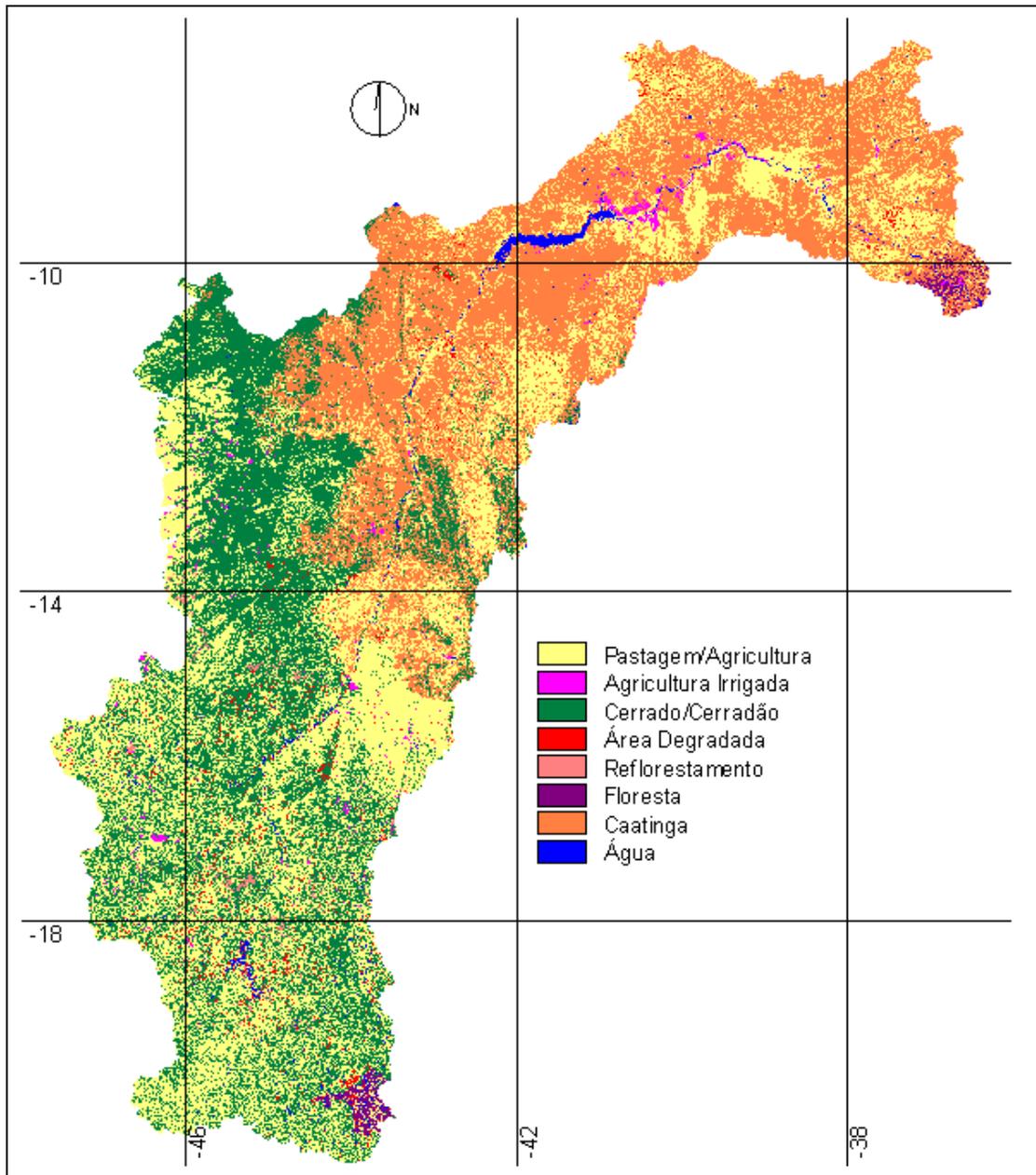


Figura 5.7: Grupos de uso do solo e cobertura vegetal na bacia do São Francisco

5.5 Rede de drenagem e resolução do modelo hidrológico

Para determinação de uma rede de drenagem adequada ao modelo hidrológico obteve-se um modelo numérico de terreno (MNT) de resolução 90, disponibilizado pelo USGS (<<http://seamless.usgs.gov>>). Utilizando-se esse MNT, a rede de drenagem é gerada de forma automática, através de um programa desenvolvido por Collischonn et al. (1999), conforme a metodologia de Jenson e Domingue (1988).

Para verificação da rede gerada através do MNT, é utilizado um mapa hidrográfico fornecido pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM, elaborado a partir de escala 1:100.000 (<<http://www.igam.mg.gov.br>>), que compreende somente a porção mineira da bacia (Alto São Francisco). Para o restante da bacia a rede de drenagem é obtida através das imagens Landsat TM e ETM, que possuem escala suficiente para se determinar o traçado dos cursos d'água de interesse.

Após a caracterização do comportamento climático e hidrológico da bacia, observou-se que a mesma pode ser dividida em duas regiões de características distintas entre si. Dessa forma, decidiu-se que a região do alto São Francisco e as bacias dos rios Paracatu e Urucuia fossem discretizadas em células de 0,1 por 0,1 grau (aproximadamente 10 por 10 km), pois são responsáveis por cerca de 70% da vazão total gerada na bacia. O restante da bacia foi discretizada em células 0,2 por 0,2 grau (aproximadamente 20 por 20 km), porque representam uma área bem maior do que a primeira e possuem uma produção hídrica bem menor e, portanto, uma resolução menor (0,2 por 0,2 grau) não implica em perdas de qualidade na resposta do modelo.

A Figura 5.8 apresenta a rede de drenagem topológica obtida para toda a bacia do rio São Francisco. Nesta figura a rede de drenagem está definida pelas linhas de cor preta e os pontos pretos são postos fluviométricos utilizados como referência para cálculo das áreas de drenagem. As áreas com cores diferentes representam as bacias controladas por cada um dos postos definidos para serem utilizados no processo de calibração e verificação do modelo hidrológico. Na Tabela 5.3 tem-se a relação das sub-bacias adotadas, com os postos fluviométricos de controle e as áreas de drenagem correspondentes.

É importante salientar que essa representação é apenas topológica, isto é, ela reproduz a ordem em que o escoamento deve ser processado no modelo, de montante para jusante. O dados de comprimento do rio e declividade, em cada célula da bacia, são obtidos célula por célula utilizando programas computacionais de desenho e de geoprocessamento e fornecidos ao modelo através de um arquivo de entrada no formato texto. Para a bacia do São Francisco, a discretização resultou em um total 2502 células, sendo 1567 células com resolução de 0,1 grau (cerca de 10 x 10 km) na parte alta da bacia e 935 células com resolução 0,2 grau (cerca de 20 x 20 km) na parte baixa da bacia.

Tabela 5.3: Sub-bacias consideradas para a calibração e verificação do modelo hidrológico, na bacia do rio São Francisco. MLT é a vazão média de longo período

Sub-bacia	Posto Fluviométrico	Rio	Área (km²)	MLT (m³/s)
01	Porto das Andorinhas	São Francisco	13.867	225,1
02	Velho da Taipa	Pará	7.329	101,2
03	Ponte da Taquara	Paraopeba	8.729	128,2
04	Usina Três Marias	São Francisco	50.784	685,0
05	Pirapora-Barreiro	São Francisco	62.089	858,2
06	Ponte do Licínio - jusante	Das Velhas	10.637	136,6
07	Várzea da Palma	Das Velhas	26.406	298,1
08	Cachoeira da Manteiga	São Francisco	106.749	1191,1
09	Porto dos Poções	Preto	9.407	118,6
10	Porto da Extrema	Paracatu	30.100	334,9
11	Porto Alegre	Paracatu	41.453	478,7
12	Santo Inácio	Urucuia	23.860	253,9
13	São Francisco	São Francisco	183.839	2060,6
14	Boca da Caatinga	Verde Grande	30.089	30,5
15	Juvenilia	Carinhanha	16.312	151,7
16	Bom Jesus da Lapa	São Francisco	271.635	2158,7
17	Porto Novo	Corrente	31.320	223,8
18	Morpará	São Francisco	346.825	2652,3
19	Fazenda Macambira	Grande	40698	184,5
20	Boqueirão	Grande	70866	272,1
21	Usina Sobradinho	São Francisco	503.937	2696,5
22	Ibó	São Francisco	564.658	2479,5
23	Floresta	Pajeú	12.275	14,5
24	Usina Itaparica	São Francisco	596.495	2780,0
25	Usinas Paulo Afonso e Moxotó	São Francisco	609.233	2790,8
26	Pão de Açúcar	São Francisco	608.900	2820,1
27	Foz	São Francisco	638.560	-

5.6 Blocos de tipo e uso do solo

As informações de uso do solo e de tipos de solos foram combinadas com o objetivo de gerar os blocos com os quais são subdivididas as células do modelo hidrológico distribuído. A combinação dos 9 grupos de solos com as 8 classes de uso do solo resultou em 72 classes combinadas. As classes combinadas menos frequentes foram reagrupadas de forma a diminuir o número de blocos utilizados na simulação hidrológica, resultando em 10 blocos de tipos e usos do solo, conforme a Figura 5.9 e a Tabela 5.4.

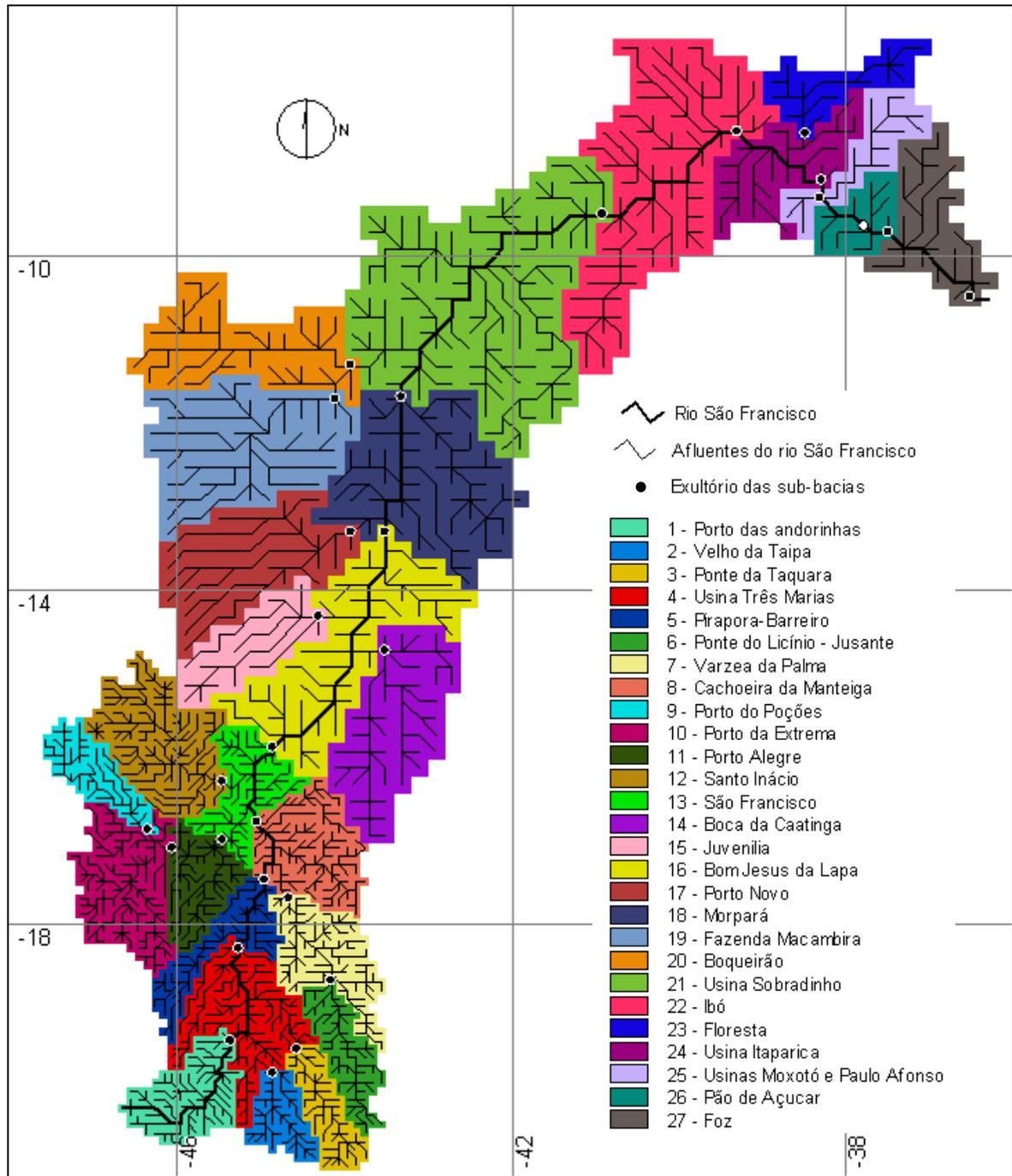


Figura 5.8: Discretização e rede de drenagem obtida para a bacia do rio São Francisco e sub-bacias selecionadas para ajuste do modelo hidrológico.

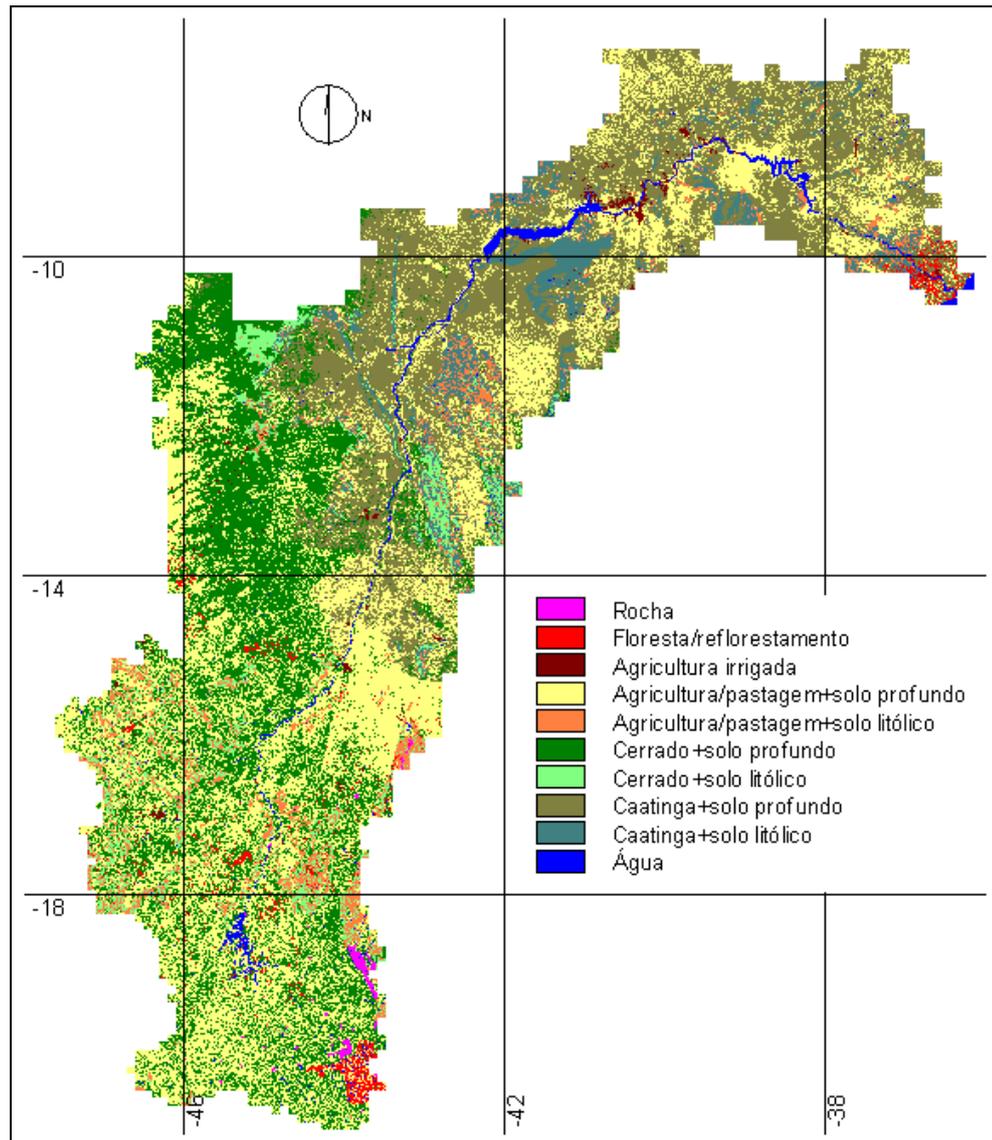


Figura 5.9: Blocos do modelo para a bacia do rio São Francisco, resultantes da combinação das classes de tipos e uso do solo.

Tabela 5.4: Blocos de tipos de solos e usos do solo da bacia do São Francisco, considerados na modelagem hidrológica.

Bloco	Descrição	Fração da área da bacia (%)
1	Rocha	0,24
2	Floresta/Reflorestamento	1,25
3	Agricultura irrigada	0,67
4	Agricultura/pastagem+solo profundo	36,62
5	Agricultura/pastagem+solo litólico	4,22
6	Cerrado+solo profundo	23,00
7	Cerrado+solo litólico	3,30
8	Caatinga+solo profundo	24,44
9	Caatinga+solo litólico	4,69
10	Água	1,57

Nota-se que existe uma predominância absoluta de blocos com solo profundo, sendo que o bloco com maior ocorrência é o 4 (Agricultura/pastagem+solo profundo), que se distribui por toda a bacia. Os blocos 8 (caatinga+solo profundo) e 6 (Cerrado+solo profundo) também apresentam grande ocorrência, porém o 8 se concentra na região do sub-médio e baixo São Francisco e o bloco 6 ocorre no alto e médio. Os blocos com solo litólico, e também a rocha, embora apresentem percentagem menor, são de grande importância por produzirem grande escoamento superficial.

5.7 Ajuste do Modelo Hidrológico MGB-IPH

Neste item é apresentado o ajuste do modelo MGB-IPH (Collischonn, 2001) à bacia do rio São Francisco. Para isso, inicialmente é apresentada uma análise das séries de vazões diárias dos principais postos do rio São Francisco, com objetivo de caracterizar a propagação ao longo de sua calha principal e detectar problemas de consistência nas informações. A seguir são descritos os procedimentos de calibração e verificação do modelo hidrológico MGB-IPH à bacia do rio São Francisco e uma avaliação dos resultados obtidos. Uma descrição da estrutura do modelo MGB-IPH é apresentada no ANEXO B desse relatório.

5.7.1 Análise da Propagação de Vazões no Rio São Francisco

O objetivo deste item é avaliar a propagação das vazões ao longo do curso principal do rio São Francisco, através da caracterização do comportamento dos hidrogramas das séries de vazões disponíveis.

Trecho entre a usina Três Marias e o posto São Francisco

Como o foco principal da pesquisa é a previsão vazões afluentes aos reservatórios hidrelétricos, os hidrogramas serão analisados inicialmente até o reservatório da Usina de Três Marias. Na Figura 5.10a são apresentados os hidrogramas de vazões até a usina de Três Marias, do período de 1/12/82 até 30/09/83. Nesta figura, para a usina de Três Marias são apresentadas séries de vazões *naturais* e as *afluentes*, descritas no item 5.2.1. Nota-se que praticamente não existem diferenças entre essas vazões, somente uma diferença mínima no

período de estiagem, indicando que os usos consuntivos a montante de Três Marias são muito pequenos.

Na Figura 5.10a também são apresentadas as vazões no posto fluviométrico Porto das Andorinhas (sub-bacia 1, conforme Figura 5.8) e um outro hidrograma com o somatório das vazões das três sub-bacias a montante da usina Três Marias, ou seja, porto das Andorinhas, Velho da Taipa e Porto Taquara. Nota-se que não se observam inconsistências entre estes hidrogramas, uma vez que as vazões em Três Marias são sempre maiores do que as dos postos de montante.

Além disso, se observa que o comportamento das vazões natural e afluente a Três Marias é muito semelhante às vazões dos postos de montante, considerando-se que as vazões de Três Marias foram estimadas por técnicas de balanço hídrico. Naturalmente, durante o ajuste do modelo, poderão ocorrer diferenças entre os valores calculados e “observados” para Três Marias, que se devem aos erros inerentes às estimativas da vazão natural e afluente.

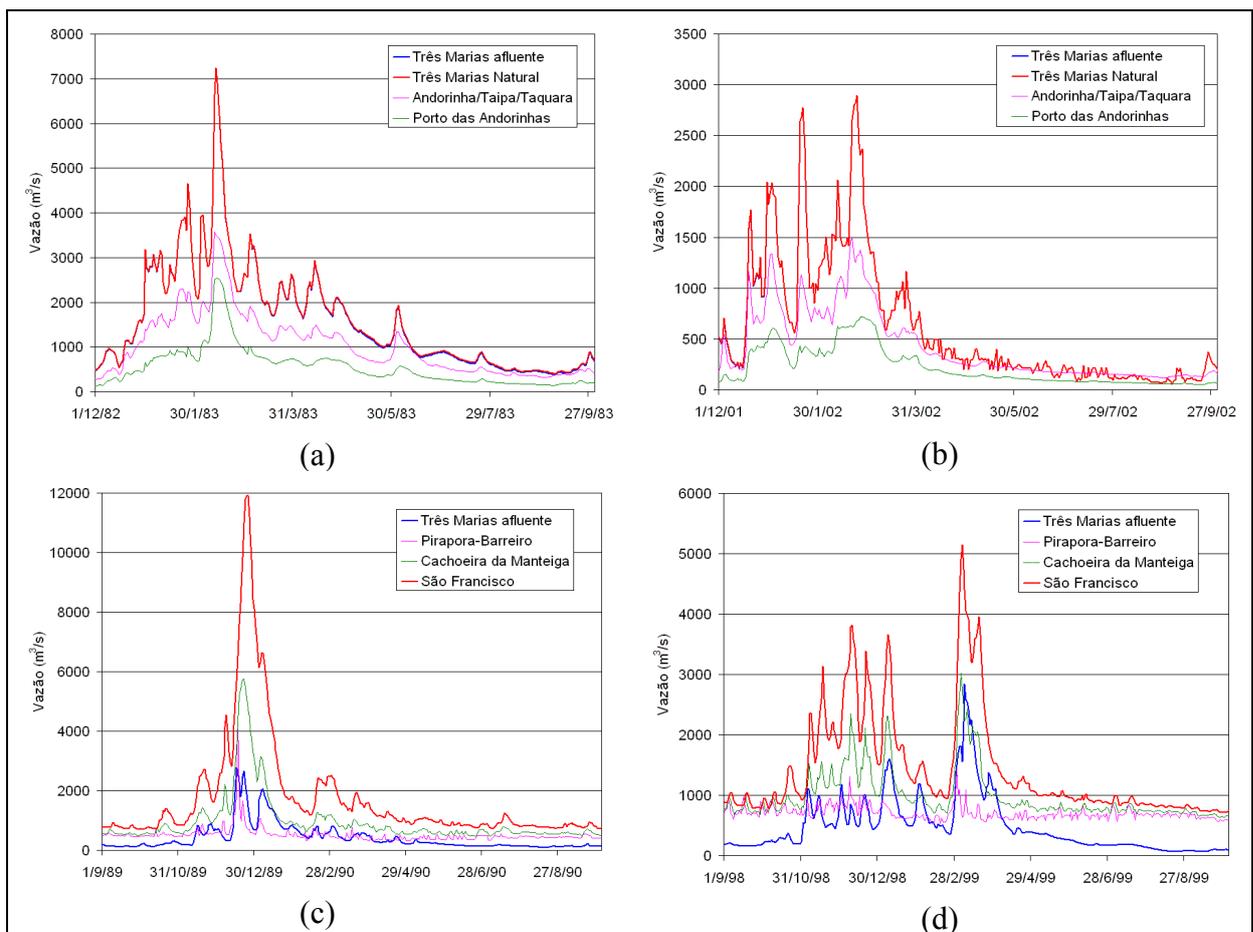


Figura 5.10: Hidrogramas de vazões no rio São Francisco: a) e b) até a usina de Três Marias; c) e d) entre Três Marias e o posto fluviométrico São Francisco:

Entretanto, para o período após 31/12/2001 a série de vazões naturais apresenta problemas por conter muitos “ruídos”, que são claramente perceptíveis durante o período de estiagem (ver Figura 5.10b). Isto ocorre porque estas vazões foram consistidas somente até dez/2001. Portanto, as análises comparativas dos resultados para os anos de 2002 e 2003 deverão apresentar, provavelmente, maiores erros.

Na Figura 5.10c,d são apresentados os hidrogramas de vazões entre Três Marias e o posto São Francisco. Nestas figuras, nota-se claramente a forte influência da operação do reservatório e Três Marias sobre as vazões, com fortes atenuações dos picos e considerável elevação nas vazões de estiagem. O posto fluviométrico Pirapora-Barreiro é o que apresenta maior influência, por estar imediatamente a jusante de Três Marias e receber pequena contribuição lateral. Em Cachoeira da Manteiga a influência ainda é bastante forte, mas é menor nos picos, devido a uma contribuição lateral mais significativa, do rio das Velhas. Nas vazões do postos São Francisco se observa um forte incremento nas vazões do período úmido, principalmente ao final de dezembro de 1989 (Figura 5.10c), devido às contribuições dos rios Urucuia e Paracatu. Entretanto, ainda é bastante significativa a influência da operação de Três Marias, como se observa nos períodos de estiagem.

Trecho entre o Posto São Francisco e a usina Sobradinho

Neste trecho foi realizada uma análise da propagação das cheias ao longo do rio São Francisco, a partir dos dados observados, para avaliar os tempos de propagação entre São Francisco e Sobradinho, e as modificações sofridas pelos hidrogramas. Ao longo deste trecho o rio São Francisco costuma receber pouca contribuição lateral, o que aumenta a importância da propagação na simulação.

Para isso foram selecionados os dados dos postos fluviométricos São Francisco, Bom Jesus da Lapa e Morpará, além dos dados de vazão afluente ao reservatório de Sobradinho, para análise da propagação das cheias.

A Figura 5.11a apresenta os hidrogramas das cheias do verão de 1987-1988 nestes locais. Observa-se que o pico da cheia ocorre primeiro em São Francisco, levando 3 a 4 dias até atingir Bom Jesus da Lapa, mais 3 a 4 dias para atingir Morpará, e mais 3 a 4 dias para atingir Sobradinho. O segundo pico de cheia da Figura 5.11a, ocorrido em fevereiro de 1988, demora 11 dias para percorrer o trecho total, de São Francisco a Sobradinho.

A Figura 5.11 também mostra que o hidrograma se altera pouco ao longo do trecho. A vazão de pico e o volume total do hidrograma são bastante parecidos, embora exista uma tendência à suavização do hidrograma, com a atenuação de alguns picos secundários. É

preciso salientar, entretanto, que as cheias deste período foram relativamente pequenas, com pico inferior a $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ em todos os postos. A Figura 5.11b apresenta os hidrogramas da grande cheia de 1979 nos mesmos locais. Observa-se que os hidrogramas têm um comportamento bastante parecido.

Outro aspecto importante da propagação de vazão durante as cheias no rio São Francisco é a diferença no tempo de viagem dos picos das cheias ao longo do rio. Durante as cheias pequenas, em que o nível do rio não é suficiente para inundar a planície, a velocidade de propagação é significativamente maior. Conforme apresentado anteriormente, o pico da cheia de fevereiro 1988, que é uma cheia pequena, leva 11 dias para percorrer a distância de São Francisco a Sobradinho. Já o pico da cheia de 1979, que foi uma grande cheia, leva 27 dias para percorrer a mesma distância. Da mesma forma, o pico da cheia de 1992 leva cerca de 22 dias para percorrer a distância de São Francisco a Sobradinho. Em resumo: as cheias pequenas ficam contidas dentro da calha do rio e se propagam rapidamente, e as cheias grandes inundam a várzea e se propagam lentamente.

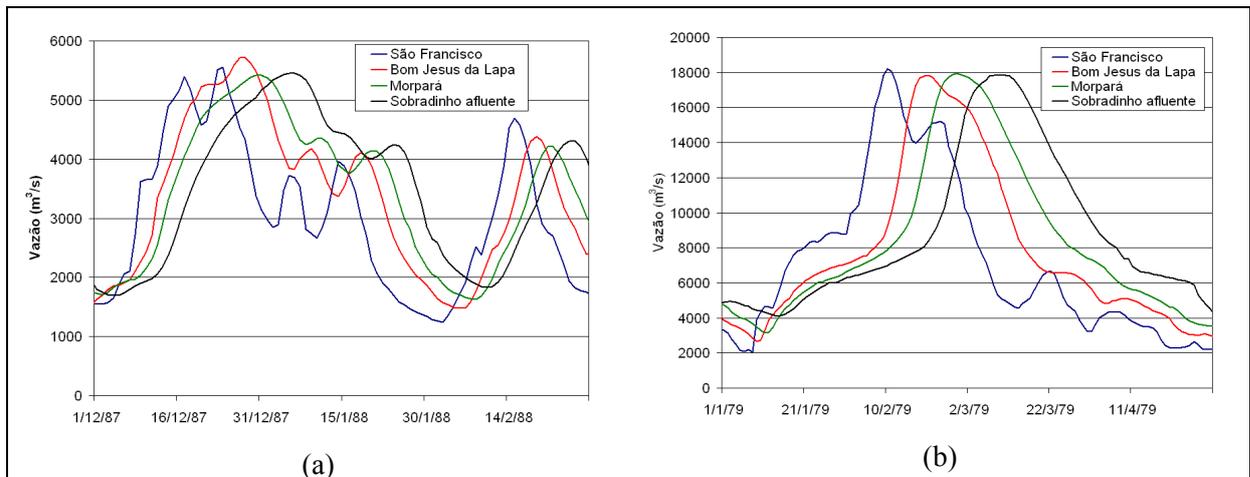


Figura 5.11: Hidrogramas das cheias entre o posto São Francisco e Sobradinho: a) verão de 1987/1988; verão de 1978/1979.

Outro aspecto importante das vazões no médio São Francisco foi identificado analisando-se as vazões no período de estiagem. No trecho entre Bom Jesus da Lapa e Morpará são observadas inconsistências entre os meses de abril e novembro, ou seja, nesses meses, as vazões em Morpará são menores do que a soma das vazões de Bom Jesus da Lapa e de Porto Novo no rio Corrente, conforme pode ser observado na Figura 5.12.

Uma das explicações para estas diferenças poderia ser o aumento de retiradas de água para usos consuntivos, entretanto, em alguns anos os valores são muito elevados, alcançando

mais de $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Podem ser consideradas ainda as perdas por evaporação ao longo do trecho, mas mesmo assim as perdas são observadas são muito elevadas. De maneira geral as inconsistências têm sido mais frequentes em anos recentes, a partir do início da década de 90, mas também ocorrem em anos anteriores.

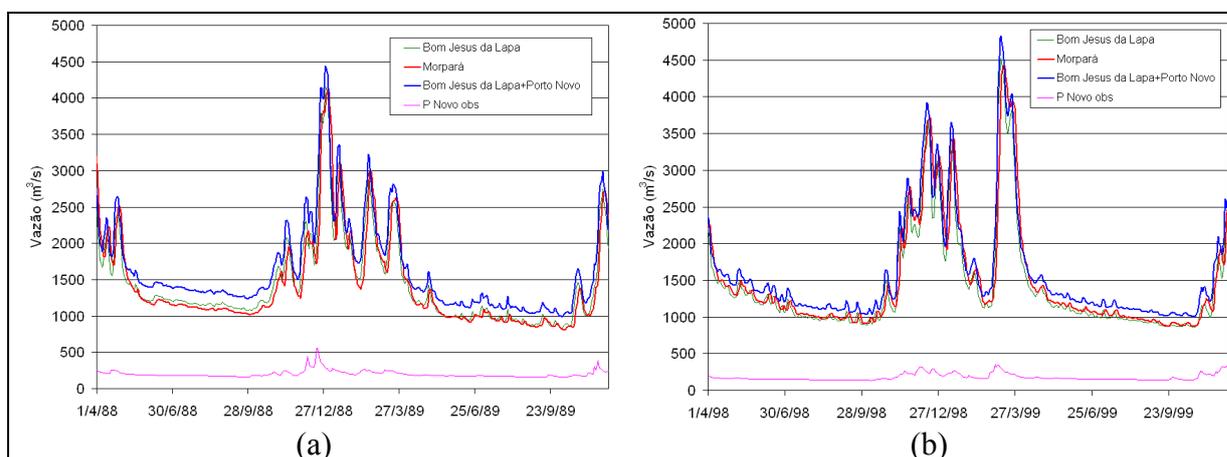


Figura 5.12: Hidrogramas de vazões do rio São Francisco destacando a inconsistência dos períodos úmidos, entre os postos Bom Jesus da Lapa e Morpará: a) abril/88 a setembro/89; b) abril/98 a setembro/99.

Esse problema não foi identificado em análises recentes dos dados fluviométricos do rio São Francisco (ONS, 2003a). A análise dos hidrogramas indica que uma hipótese provável seja a existência de erros nas medições e/ou no traçado das curvas de descarga de um ou mais postos deste trecho.

A Figura 5.13 mostra a curva-chave do posto Morpará, revisada no estudo de consistência apresentado por ONS, 2003a, que estipula uma única curva para o período de 19/05/1957 a 31/12/2003. As vazões utilizadas neste trabalho, obtidas do banco de dados da ANA e ANEEL, foram determinadas com a curva da Figura 5.13. Entretanto, analisando com maior detalhe o ramo inferior da curva, conforme mostrado na Figura 5.14, nota-se uma mudança de tendência nas medições para o período recente, a partir do final de 1985. Essa mudança de tendência indica que a curva-chave atualmente utilizada para o posto Morpará (linha verde na Figura 5.14) subestima as vazões em uma ampla faixa de cotas (de 200 a 700 cm, equivalente à faixa de vazões de, aproximadamente, 750 a $5000 \text{ m}^3/\text{s}$). Ou seja, de maneira geral se observa uma subestimativa em torno de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ para os anos a partir de 1985. Isto explica uma grande parte da inconsistência entre Bom Jesus da Lapa e Morpará, mas a porcentagem não explicada ainda é muito elevada.

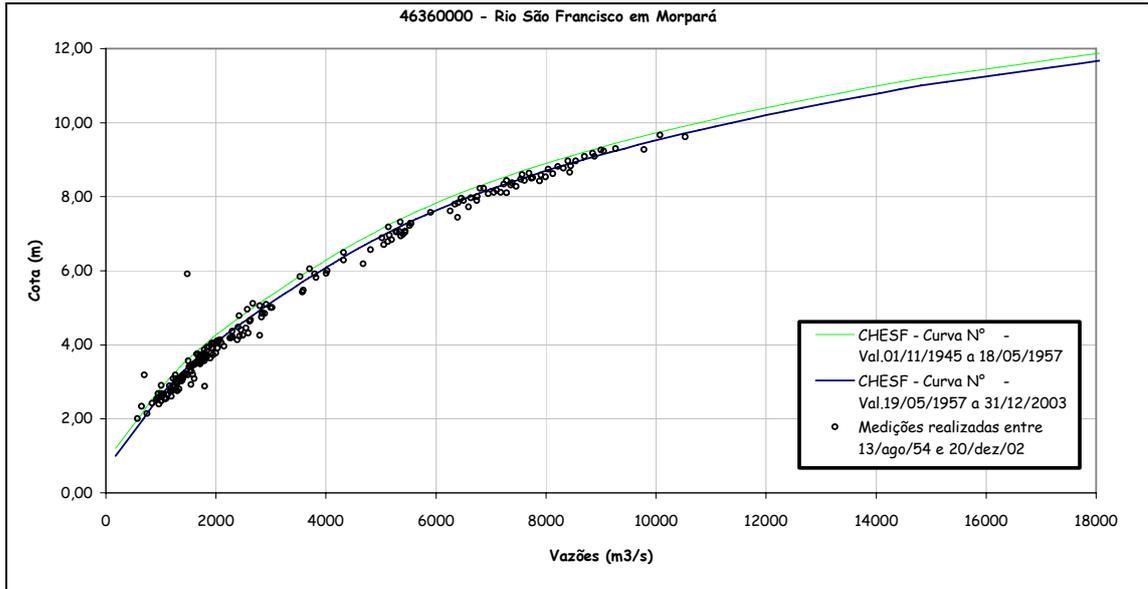


Figura 5.13: Curva-chave do posto Morpará, determinada após os estudos de revisão das séries de vazões naturais do SIN (Fonte: ONS, 2003a)

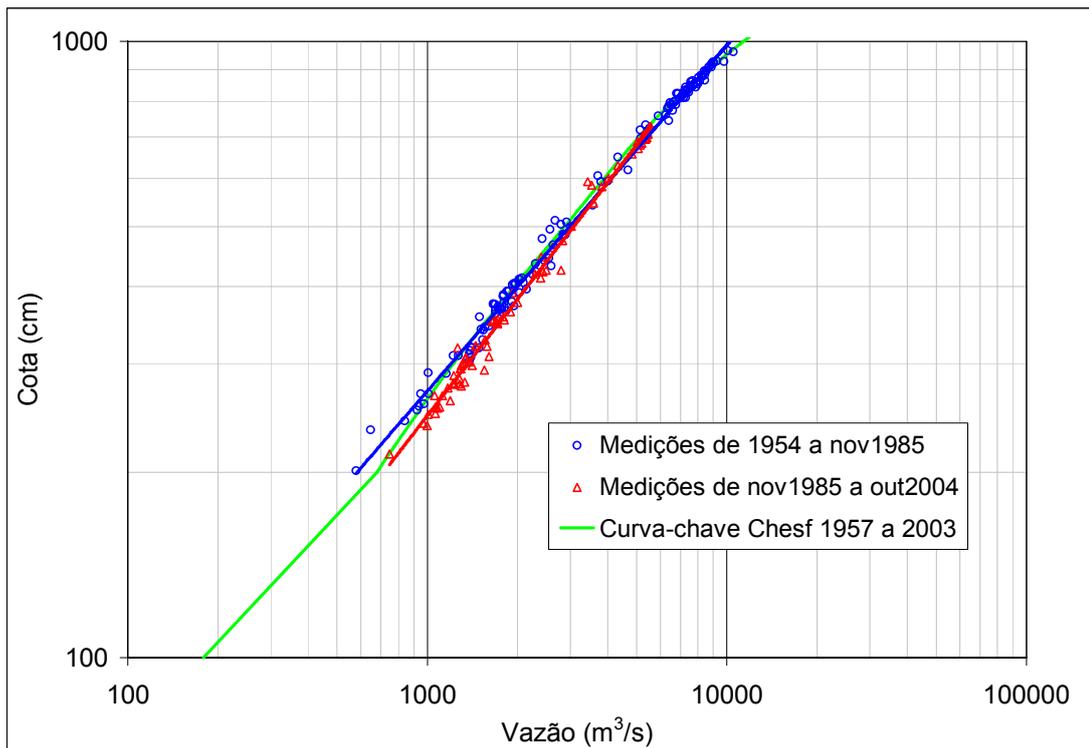


Figura 5.14: Detalhe das medições de descarga e curva-chave do posto Morpará. As linhas azul e vermelha são curvas do tipo potência, ajustadas aos pontos de mesma cor.

Devido a inconsistências semelhantes no trecho Morpará e Sobradinho, para esta pesquisa não será feita correção da curva chave de Morpará para geração de novas vazões, ou seja, serão mantidas as vazões geradas pela curva-chave do banco de dados ANA/ANEEL. As

inconsistências em Morpará serão tratadas de forma simplificada, assim como em Sobradinho, sem que hajam prejuízos aos objetivos propostos, conforme é descrito nos itens seguintes.

Conforme já mencionado, uma análise semelhante também foi realizada nos hidrogramas entre o posto fluviométrico Morpará e a usina Sobradinho, conforme apresentado na Figura 5.15. Nesta figura as vazões *afluentes* e *naturais* de Sobradinho são comparadas com a soma das vazões dos postos Morpará e Boqueirão (rio Grande). Novamente, nota-se a existência de inconsistências bastante significativas durante os períodos de estiagens dos hidrogramas, uma vez que as vazões em Sobradinho estão com valores menores do que nos postos de montante.

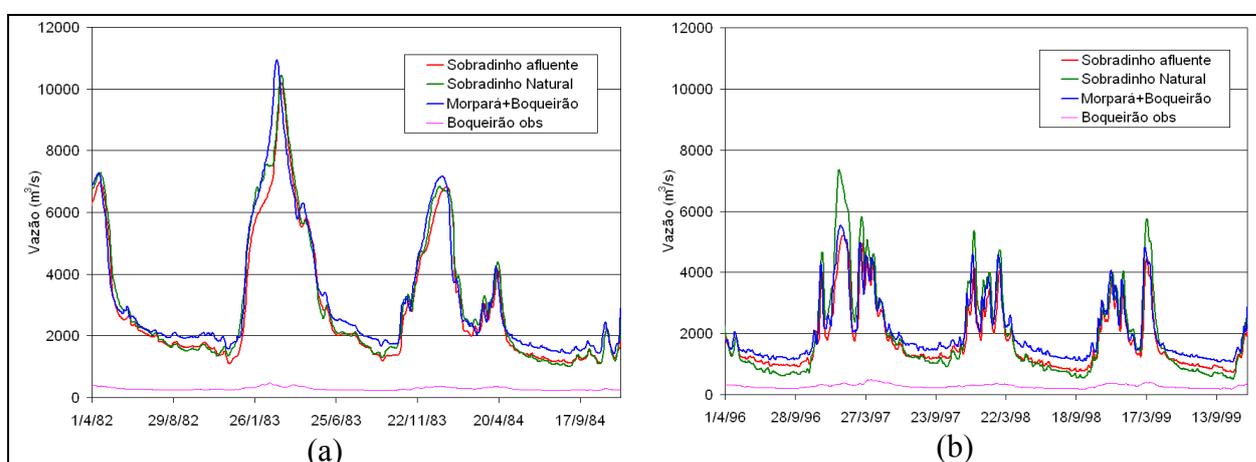


Figura 5.15: Hidrogramas de vazões afluentes a usina de Sobradinho: a) abril/82 a setembro/84; b) abril/96 a setembro/99.

Na Figura 5.16 as perdas de vazão no trecho entre Bom Jesus da Lapa e Sobradinho são apresentadas graficamente, para o período de 1980 a 1997. Nestas figuras são apresentadas as perdas em valores diários (linha azul) e a média móvel de 30 dias dos valores diários (linha vermelha). A média móvel tem o objetivo de apenas facilitar a visualização do gráfico. Nota-se que entre Bom Jesus da Lapa e Morpará as perdas oscilam em torno de um valor médio igual a $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Já entre Morpará e Sobradinho o valor médio das perdas é de aproximadamente $250 \text{ m}^3/\text{s}$. Ou seja, a perda média no trecho entre Bom Jesus da Lapa e a usina de Sobradinho pode ser estimada em $350 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando-se somente a contribuição lateral dos rios Corrente e Grande.

No caso das afluências a Sobradinho, as inconsistências já foram identificadas em estudos anteriores (ONS, 2003b), mas ainda não foram determinadas quais as causas de diferenças tão grandes. Somente o aumento nos usos consuntivos não explica o problema.

Existem muitas questões não respondidas em relação ao balanço hídrico do reservatório de Sobradinho, que apresenta muitas incertezas devido à grande dimensão da área alagada, pouca profundidade e às elevadas taxas de evaporação que são características do clima semi-árido, além das incertezas devido às inconsistências identificadas entre Bom Jesus da Lapa e Morpará.

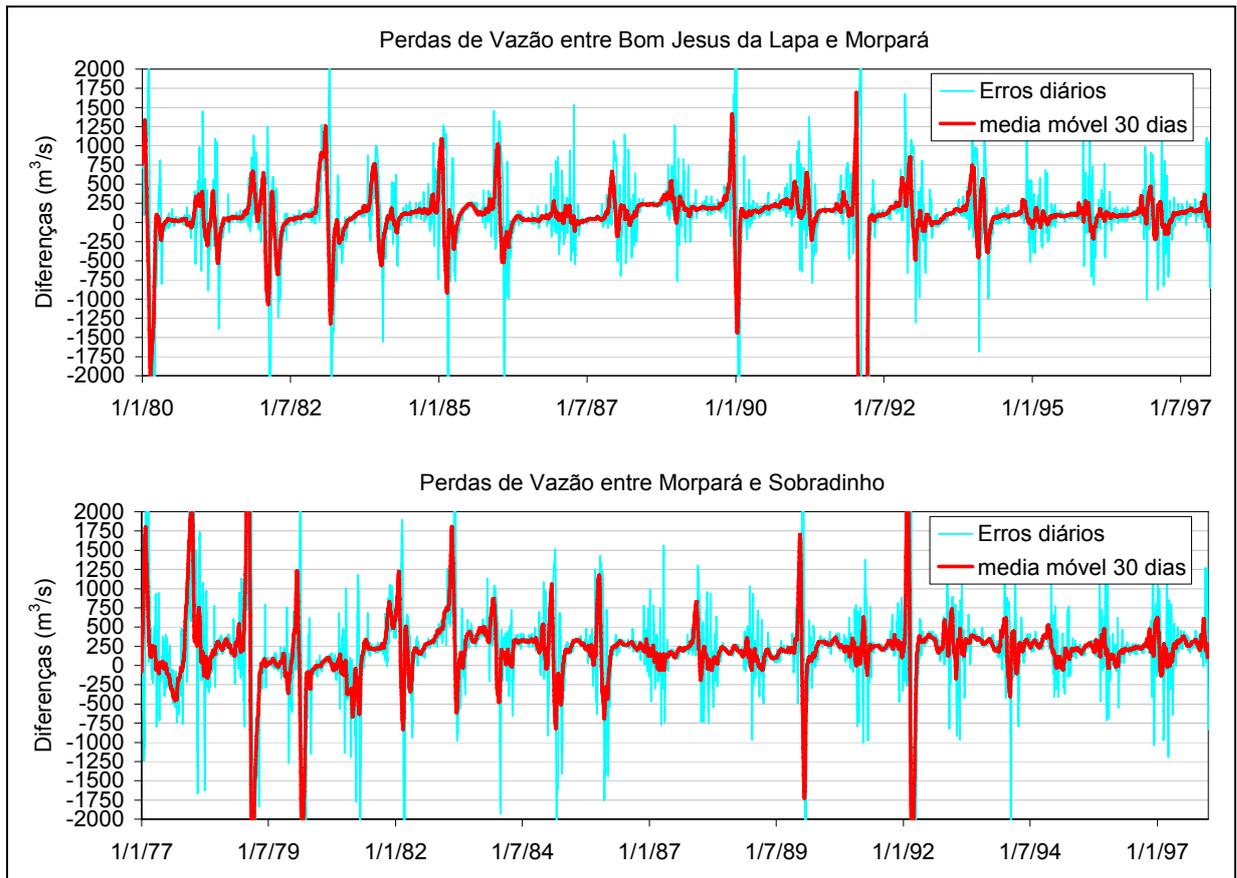


Figura 5.16: Perdas de vazão no rio São Francisco, no trecho entre Bom Jesus da Lapa e a usina de Sobradinho.

Cabe ressaltar que, em face da grande importância do reservatório de Sobradinho para o sistema energético da região Nordeste, tais inconsistências deveriam ser amplamente investigadas, através da melhoria e ampliação das medições dos fluxos envolvidos (vazão, evaporação, batimetria do reservatório, etc) e da utilização de modelagem matemática dos rios e da atmosfera. Para se ter uma idéia da importância dos valores envolvidos, de acordo com ONS (2003b), uma diferença de $290 \text{ m}^3/\text{s}$ na afluência de Sobradinho, constatada em janeiro de 2003, equivale a uma perda de energia de aproximadamente 783MW médio ao longo do mês, suficientes para abastecer uma cidade de mais de 1.500.000 habitantes.

Assim como no trecho Bom Jesus da Lapa e Morpará, nesta pesquisa as causas destas inconsistências serão apenas tratadas de forma simplificada para que possam ser atendidos os objetivos propostos.

5.7.2 Calibração do modelo hidrológico

Os dados observados selecionados na bacia do rio São Francisco estendem-se de 1977 até 2003, e após análise realizadas nas séries, descritas no item 5.2, selecionou-se o período de 1977 a 1986 para a calibração do modelo hidrológico MGB-IPH, enquanto o período de 1986 a 1997 foi escolhido para realizar a verificação do ajuste.

Os parâmetros do modelo foram determinados pela metodologia de calibração automática multi-objetivo, com base na técnica de *algoritmos genéticos*, descrita por Collischonn (2001). Para avaliação da qualidade do ajuste foram consideradas as seguintes funções objetivo:

i) Coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões diárias,

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5.1)$$

ii) Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões diárias

$$NS_{\log} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \log Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \overline{\log Q_{obs}})^2} \quad (5.2)$$

iii) Erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias,

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{cal}) - \sum_{t=1}^n (Q_{obs})}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \quad (5.3)$$

Onde: t indica o intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo; V é o volume; ΔV é o erro relativo adimensional deste volume; Q_{cal} é a vazão calculada no posto; Q_{obs} é a vazão observada; e $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas.

Na calibração do modelo na parte alta da bacia do rio São Francisco, região de resolução 0,1 grau, foram utilizados os dados dos 12 postos fluviométricos e da usina de Três Marias, que definem as sub-bacias de 1 a 13 (Figura 5.8). Em relação as hipóteses e procedimentos adotados nesta região, os seguintes comentários devem ser destacados:

- a. Apenas a usina de Três Marias foi considerada na bacia. O efeito de Pequenas Centrais Hidrelétricas existentes nos rios São Francisco, Pará, Paraopeba e das Velhas, não foi considerado. Essa simplificação foi adotada porque os volumes dos reservatórios destas PCHs são relativamente pequenos, e sua operação pouco influencia os hidrogramas observados a jusante.
- b. No local em que está a Usina de Três Marias a vazão utilizada para a calibração foi a vazão afluente, estimada pelo balanço hídrico do reservatório.
- c. Para permitir a calibração do modelo nos locais a jusante da Usina de Três Marias, a vazão calculada na Usina foi substituída pela vazão total defluente do reservatório e da usina. Essa vazão defluente foi propagada para jusante, recebendo a contribuição dos afluentes e pode ser comparada aos hidrogramas observadas nos postos fluviométricos. Esse procedimento influencia os resultados, uma vez que em postos fluviométricos imediatamente a jusante da usina os resultados tendem em serem muito bons.

Na região do Médio e Baixo São Francisco foram utilizados dados de 10 postos fluviométricos (Pão de Açúcar, Ibó, Morpará, e Bom Jesus da Lapa no rio São Francisco; Boca da Caatinga no rio Verde Grande; Juvenília no rio Carinhanha; Porto Novo no rio Corrente; Fazenda Macambira e Boqueirão no rio Grande e Floresta no rio Pajeú) e das Usinas de Sobradinho, Itaparica, Moxotó e Paulo Afonso.

Para representar o comportamento não-linear da propagação de vazão durante as cheias do rio São Francisco, destacado no item Figura 5.11, foi necessário realizar algumas modificações da metodologia utilizada no modelo MGB-IPH. A metodologia originalmente utilizada no MGB-IPH é baseada no modelo Muskingum-Cunge linear, que considera um único valor da celeridade da onda de cheia. Para representar a propagação de cheias entre São Francisco e Sobradinho, em que a celeridade é muito menor durante as grandes cheias, foi incluída a metodologia de propagação pelo método de Muskingum-Cunge não linear com planície de inundação (Tucci, 1998).

A utilização da metodologia de Muskingum Cunge não-linear permitiu reproduzir razoavelmente bem a mudança de celeridade das ondas de cheia e também a atenuação dos hidrogramas. Infelizmente, existem poucos dados de seções transversais do rio e da planície disponíveis, para permitir a geração de um modelo mais detalhado deste trecho do rio, o que limita a aplicação desta metodologia. Por exemplo, não é bem conhecida a largura da planície de inundação em diversos pontos, e a altura d'água necessária para inundá-la. As estimativas utilizadas neste trabalho foram obtidas de imagens de satélite e do modelo numérico do terreno.

Na Tabela 5.5 é apresentado o resumo dos valores das funções objetivo nos diferentes postos fluviométricos, para o período de calibração do modelo hidrológico, e no ANEXO B estão listados os valores obtidos para os parâmetros. Na Tabela 5.5 se observa que, de maneira geral, o ajuste do modelo é muito bom na grande maioria das sub-bacias. Na região de alta resolução do modelo hidrológico (sub-bacias de 1 a 13), as funções NS e NS_{\log} têm valores sempre acima de 0,80 e os erros de volumes são muito baixos.

No trecho entre o posto São Francisco e a foz do Rio Grande houve maior dificuldade para o ajuste, principalmente nas sub-bacias da margem direita, caracterizadas por rios intermitentes. Neste caso, mesmo para a bacia do rio Verde Grande o ajuste foi considerado muito bom. Nos demais rios da margem direita, os parâmetros foram ajustados avaliando-se a vazão do rio São Francisco, que é muito maior e torna muito pequeno o peso desses afluentes. Isto ocorre nas sub-bacias de número 16 e 18, onde os postos de ajuste são Bom Jesus da Lapa e Morpará.

Nas sub-bacias a jusante da Foz do Grande (21 a 27), quando os afluentes do rio São Francisco são analisados individualmente se verifica que o modelo não apresenta bom desempenho, conforme mostrado pelos resultados da sub-bacia 23 (rio Pajeú em Floresta). Nas demais bacias desse trecho os resultados são bons devido às vazões do rio São Francisco, que recebe muito pouca contribuição lateral. Nota-se que um erro grande de volume em

Sobradinho, assim como em Morpará, que se devem a problemas que serão discutidos a frente.

A Figura 5.17 apresenta os hidrogramas calculado e observado no rio São Francisco nos postos fluviométrico Porto Andorinha (13867 km²) e Porta da Taquara (8729 km²), no período de janeiro de setembro de 1982 a setembro de 1985. Observa-se que há alguns eventos de cheia subestimados e outros superestimados, porém o comportamento geral dos hidrogramas observados é muito bem representado pelo modelo em ambos os postos.

Tabela 5.5: Valores das funções objetivo obtidos na calibração do modelo MGB-IPH para a bacia do rio São Francisco no período de 1/1/1977 a 31/12/1987.

Nº	Rio	Local	NS	NS _{log}	ΔV (%)
1	São Francisco	Porto Andorinhas	0.89	0.94	0.088
2	Pará	Velho da Taipa	0.89	0.90	0.034
3	Paraopeba	Ponte da Taquara	0.84	0.89	0.105
4	São Francisco	UHE Três Marias	0.90	0.87	0.746
5	São Francisco	Pirapora	0.95	0.95	-1.928
6	Velhas	Ponte do Licínio	0.80	0.88	0.412
7	Velhas	Várzea da Palma	0.87	0.93	-0.042
8	São Francisco	Cachoeira da Manteiga	0.96	0.96	3.071
9	Preto	Porto dos Poções	0.87	0.84	-0.453
10	Paracatu	Porto da Extrema	0.93	0.92	0.200
11	Paracatu	Porto Alegre	0.93	0.93	-0.327
12	Urucuia	Santo Inácio	0.90	0.90	-0.500
13	São Francisco	São Francisco	0.98	0.98	1.657
14	Verde Grande	Boca da Caatinga	0.85	0.83	-4.032
15	Carinhanha	Juvenília	0.92	0.93	-0.048
16	São Francisco	Bom Jesus da Lapa	0.95	0.96	2.378
17	Corrente	Porto Novo	0.83	0.84	-1.536
18	São Francisco	Morpará	0.93	0.94	6.626
19	Grande	Fazenda Macambira	0.88	0.90	0.139
20	Grande	Boqueirão	0.85	0.86	-0.206
21	São Francisco	Sobradinho	0.85	0.79	18.617
22	São Francisco	Ibó	0.94	0.88	9.412
23	Pajeú	Floresta	0.54	0.31	-0.521
24	São Francisco	Itaparica	0.94	0.89	6.552
25	São Francisco	Paulo Afonso - Moxotó	0.93	0.88	7.683
26	São Francisco	Pão de Açúcar	0.99	0.99	-0.718
27	São Francisco	Foz	-	-	-

Na Figura 5.18 são apresentados os hidrogramas afluentes ao reservatório da UHE Três Marias, no rio São Francisco, no período de dezembro de 1980 a setembro de 1987. Observa-se que o comportamento geral do hidrograma observado é bem reproduzido, embora as maiores cheias tenham sido subestimadas. Na Figura 5.18 também pode-se identificar

algumas possíveis inconsistências na série de vazões afluentes, durante as estiagens dos anos de 1984 e 1986 (períodos marcados em azul). Nestes dois períodos pode-se notar que, próximo do hidrograma atingir seu mínimo, ocorre uma queda mais acentuada nas vazões, sendo mais pronunciada em 1986. O modelo hidrológico tem dificuldade em reproduz esse comportamento. Este fato pode ser por deficiência no modelo, mas possivelmente se deve a erros no processo de estimativa das vazões afluentes, que é feito por balanço hídrico do reservatório.

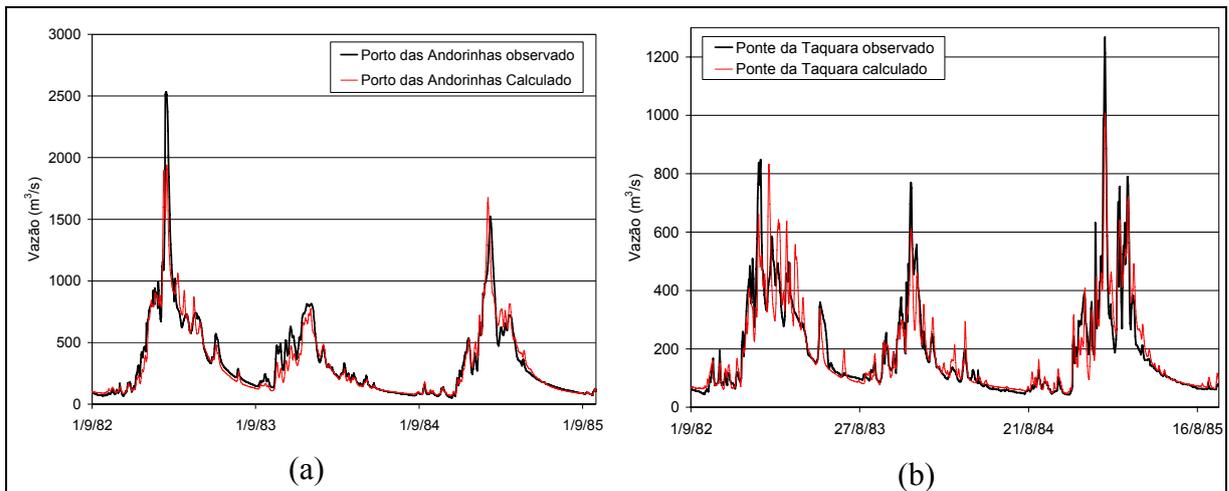


Figura 5.17: Hidrogramas calculado e observado do rio São Francisco nos postos fluviométricos (a) Porto Andorinha e (b) Porto da Taquara, de setembro de 1982 a setembro de 1985.

Um detalhe, correspondente ao período de outubro de 1984 a maio de 1986, dos hidrogramas calculado e observado afluentes ao reservatório de Três Marias é apresentado na Figura 5.19. Nota-se que o modelo sub ou superestima alguns picos, mas representa muito bem todo o hidrograma, incluindo as pequenas variações de maior frequência.

A Figura 5.20a apresenta os hidrogramas calculado e observado no rio São Francisco no posto fluviométrico de Pirapora-Barreiro, no período de setembro de 1981 a setembro de 1983. Esse posto está a jusante da UHE Três Marias e a vazão do rio tem forte influência da vazão defluente da usina. Assim, o hidrograma do rio São Francisco em Pirapora é resultante da operação da Usina e do reservatório, embora tenha influência da bacia do rio Abaeté, que contribui a jusante da usina. Observa-se nesta figura que a UHE Três Marias mantém a vazão relativamente constante durante todo o período de estiagem. Entretanto, durante o período de cheia, o hidrograma apresenta rápidas e grandes variações de vazão. Alguns picos de cheia

secundários não são corretamente reproduzidos no hidrograma calculado pelo modelo, entretanto o comportamento geral é bem reproduzido.

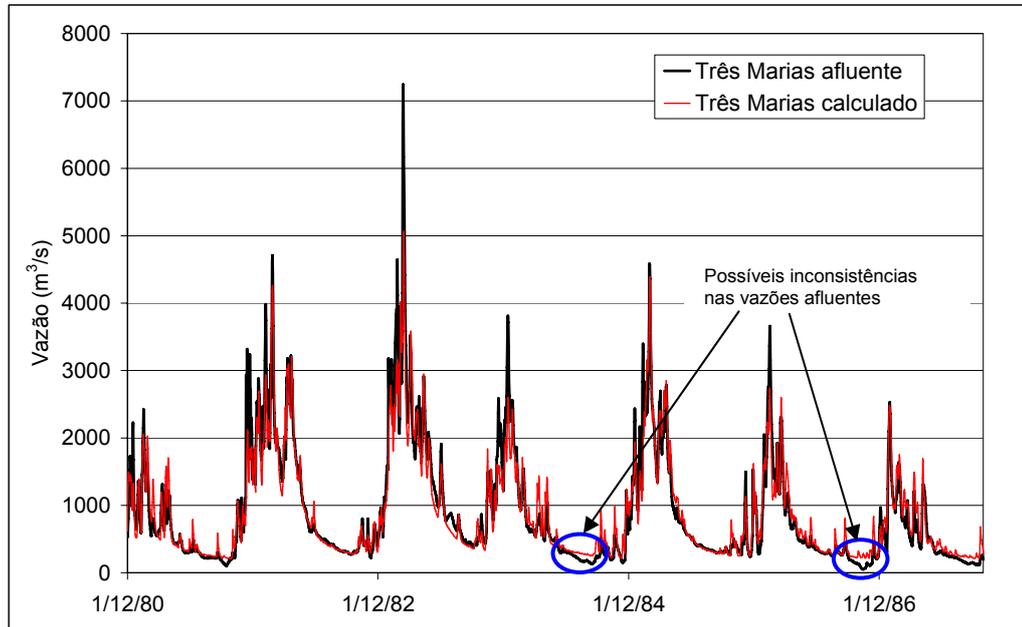


Figura 5.18: Hidrogramas calculado e observado do rio São Francisco na UHE Três Marias, de dezembro de 1980 a setembro de 1987.

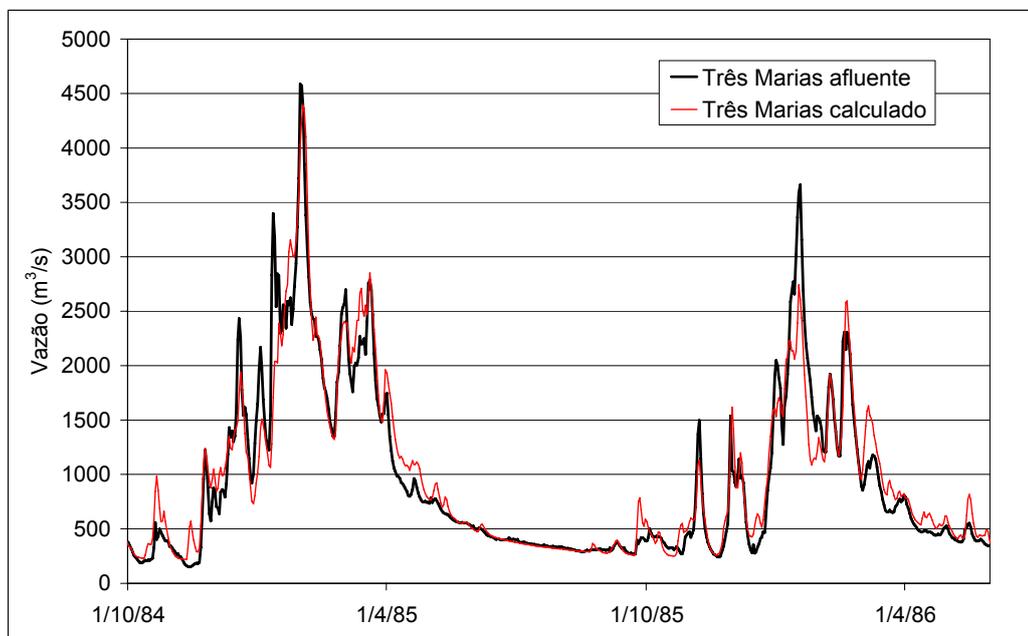


Figura 5.19: Hidrogramas calculado e observado do rio São Francisco na UHE Três Marias, de outubro de 1984 a maio de 1986.

A Figura 5.20b apresenta os hidrogramas calculado e observado no posto fluviométrico Porto Alegre, no rio Paracatu, no período de outubro de 1984 a junho de 1986. O rio Paracatu é um dos mais importantes afluentes do São Francisco e se observa que os resultados da calibração do modelo hidrológico são bons, embora a bacia do rio Paracatu tenha uma densidade de postos pluviométricos menor do que a região dos rios Pará, Paraopeba e das Velhas.

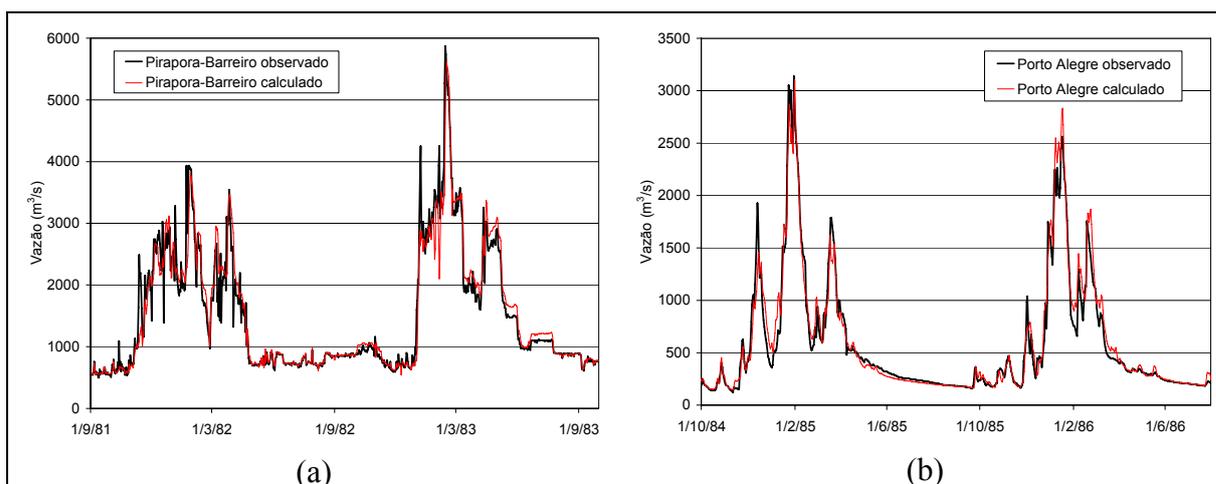


Figura 5.20: Hidrogramas calculado e observado: (a) rio São Francisco no posto fluviométrico Pirapora-Barreiro; (b) rio Paracatu em Porto Alegre.

O posto fluviométrico São Francisco define, nesta pesquisa, o limite entre as regiões do Alto e Baixo São Francisco. A maior parte da vazão da bacia do São Francisco é gerada na região a montante deste posto. Por isto, esse posto recebeu grande atenção no processo de calibração do modelo hidrológico. A Figura 5.21 apresenta os hidrogramas calculado e observado no período de calibração, período de setembro de 1978 a setembro de 1983. Observa-se que, de maneira geral, o ajuste entre o hidrograma calculado e o observado é melhor neste local do que nos locais a montante.

Um posto fluviométrico muito importante ao longo do rio São Francisco é o posto Morpará, que está localizado a montante do reservatório de Sobradinho. Entre Morpará e a barragem de Sobradinho existe apenas um afluente importante ao rio São Francisco, o Rio Grande. Ou seja, o posto fluviométrico Morpará permite estimar, com razoável precisão, a vazão afluente ao reservatório de Sobradinho. A Figura 5.22 apresenta os hidrogramas observado e calculado no posto fluviométrico Morpará, no período de calibração, onde se observa-se que o ajuste é muito bom, tanto nas vazões baixas como nas cheias. Destaca-se o

período úmido 1978/1979, conhecido como a grande cheia do rio São Francisco, que está muito bem representado.

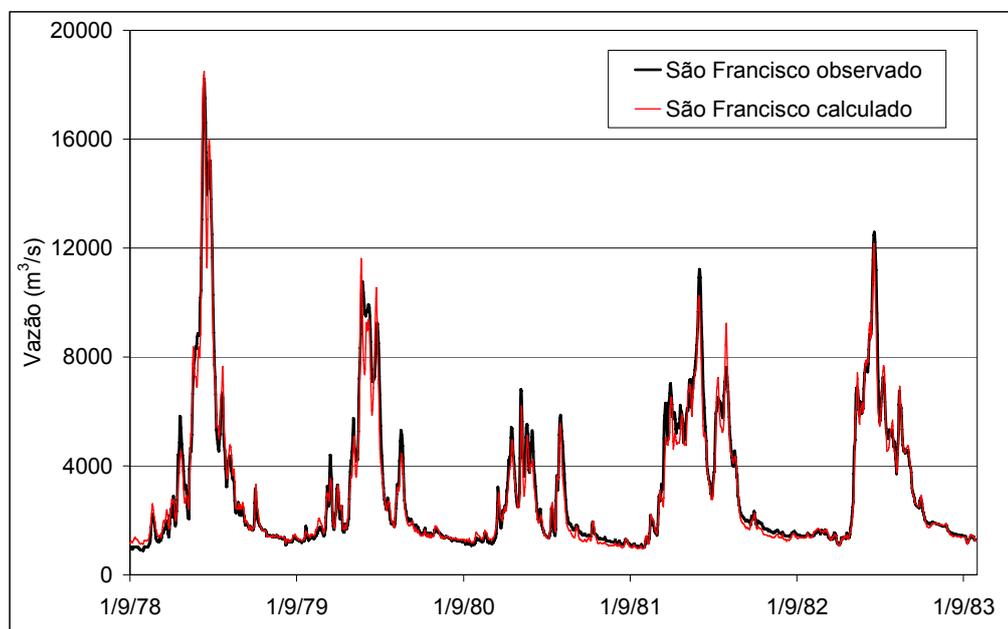


Figura 5.21: Hidrogramas calculado e observado do rio São Francisco no posto fluviométrico São Francisco, período de setembro de 1978 a setembro de 1983.

A Figura 5.23 apresenta as vazões calculadas e observadas afluentes ao reservatório da usina Sobradinho. É importante destacar que estes hidrogramas referem-se às vazões afluentes observadas, e não às vazões naturais. Pode-se observar que a maioria dos picos foram superestimados, embora o comportamento do hidrograma esteja bem representado. Destaca-se ainda, na Figura 5.23, que as vazões dos períodos de estiagem são bastante superestimadas, alcançando um valor médio em torno de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ a partir de 1983. Estas diferenças reforçam os problemas detectados na análise das vazões observadas no trecho entre o posto Bom Jesus da Lapa e Sobradinho (item 6.7.1.2), que sugerem a existência de perdas não contabilizadas e/ou problemas na determinação das vazões observadas.

A jusante de Sobradinho os hidrogramas do rio São Francisco observados nos postos fluviométricos ou afluentes aos reservatórios são completamente dominados pela operação do reservatório de Sobradinho, uma vez que a contribuição lateral é normalmente reduzida. Dessa forma, nessa pesquisa as análises irão se concentrar nas vazões até Sobradinho, embora tenham sido geradas vazões para os locais a jusante.

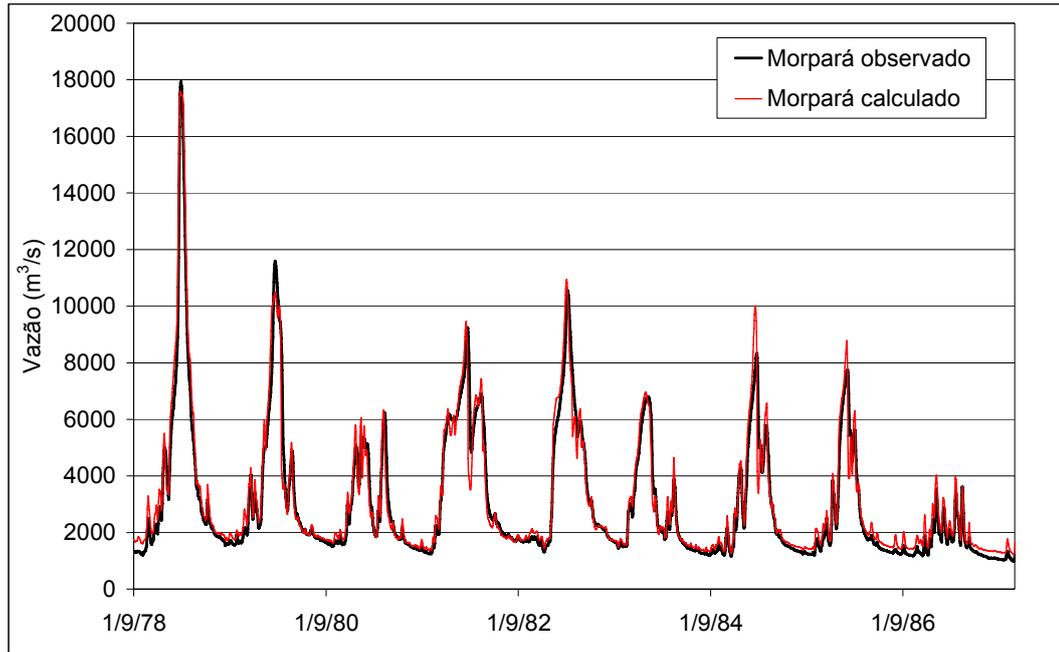


Figura 5.22: Hidrogramas observado e calculado no rio São Francisco em Morpará, de setembro de 1978 a outubro de 1987.

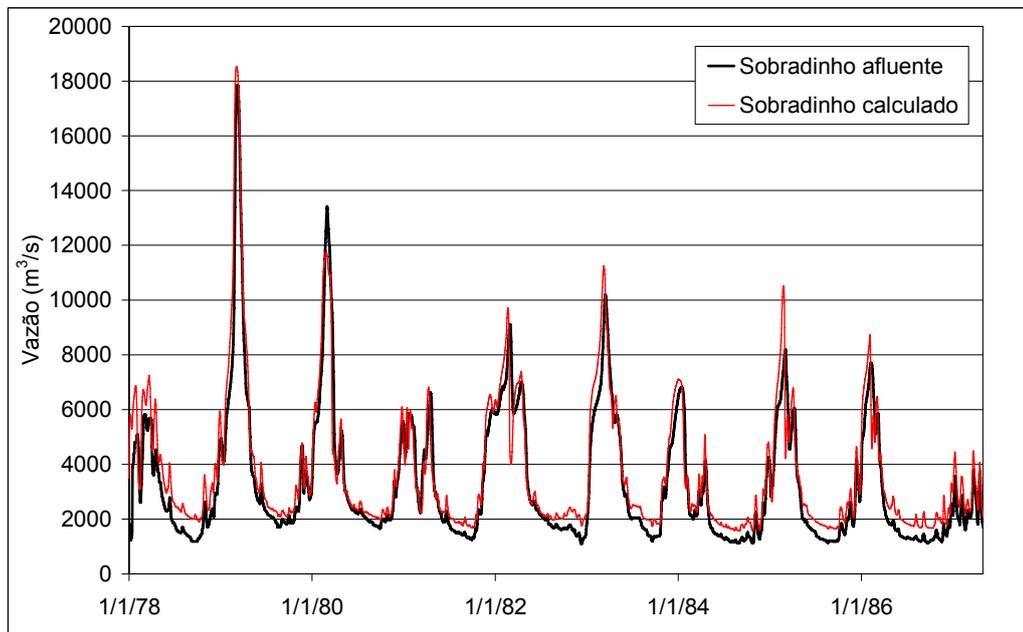


Figura 5.23: Hidrogramas calculado e observado do rio São Francisco afluentes ao reservatório de Sobradinho, de janeiro de 1978 a setembro de 1987.

5.7.3 Verificação da calibração do modelo hidrológico

A verificação da calibração do modelo foi realizada com base em dados hidrológicos do período de janeiro de 1988 a dezembro de 1996. De forma semelhante ao período de calibração, as vazões calculadas nos locais das barragens foram substituídas internamente no modelo pelas vazões defluentes observadas das usinas. Estas vazões defluentes foram propagadas para jusante, recebendo a contribuição da bacia incremental. Esse procedimento foi repetido em Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso - Moxotó e Xingó. A Tabela 5.6 apresenta os valores das funções objetivo no período de verificação em todos os locais selecionados, que incluem as principais usinas e alguns postos fluviométricos.

Em geral, os valores das funções objetivo apresentados na Tabela 5.8 mostram que o ajuste do modelo permanece bom. Na UHE Três Marias, por exemplo, o coeficiente de Nash Sutcliffe (NS) passa de 0,90 no período de calibração para 0,85 no período de verificação, o que pode ser considerado um pequeno decréscimo de qualidade. Já o erro de volumes totais calculados aumenta bastante, passando de 0,75 para 20,46%. Na região de alta resolução do modelo hidrológico, outras duas bacias têm aumentos expressivos no erro de volume, mas em todos os postos são mantidos valores elevados de NS e NS_{\log} .

Nas sub-bacias localizadas a jusante do posto São Francisco destaca-se a queda de desempenho no rio Verde Grande (sub-bacia 14), que era esperado devido às características dos rios intermitentes. Nas bacias do oeste baiano (rios carinhanha, corrente e Grande) também há um decréscimo das funções objetivo, mas com menor intensidade.

No curso principal do rio São Francisco, destaca-se o grande erro de volume no posto fluviométrico Morpará (de 6,64 para 14,1%), além da redução no coeficiente NS_{\log} de 0,94 para 0,86, indicando uma piora na simulação das vazões de estiagem.

No reservatório de Sobradinho o coeficiente de Nash-Sutcliffe passa de 0,85 no período de calibração para 0,83 no período de verificação, o que pode ser considerado como uma excelente manutenção do desempenho. Já o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos da vazão passa de 0,79 para 0,67, e o erro dos volumes calculados passa de 18,62 para 25,47%, o que indica uma razoável redução de desempenho. A explicação mais provável para essa diferença é o aumento no uso de água consuntivo, diretamente retirado do reservatório de Sobradinho, e as inconsistências detectadas nas vazões observadas.

Tabela 5.6: Valores das funções objetivo de vazões diárias na bacia do rio São Francisco, durante o período de verificação do modelo hidrológico MGB-IPH

Nº	Rio	Local	NS	NS _{log}	ΔV (%)
1	São Francisco	Porto Andorinhas	0.86	0.87	18.630
2	Pará	Velho da Taipa	0.85	0.83	9.202
3	Paraopeba	Ponte da Taquara	0.82	0.84	-0.471
4	São Francisco	UHE Três Marias	0.85	0.72	20.465
5	São Francisco	Pirapora	0.90	0.86	-6.584
6	Velhas	Ponte do Licínio	0.76	0.83	-2.907
7	Velhas	Várzea da Palma	0.86	0.90	0.043
8	São Francisco	Cachoeira da Manteiga	0.90	0.92	-6.710
9	Preto	Porto dos Poções	0.79	0.79	-1.255
10	Paracatu	Porto da Extrema	0.92	0.91	-2.011
11	Paracatu	Porto Alegre	0.90	0.91	1.919
12	Urucuia	Santo Inácio	0.80	0.86	1.293
13	São Francisco	São Francisco	0.97	0.96	1.178
14	Verde Grande	Boca da Caatinga	0.83	0.12	14.158
15	Carinhanha	Juvenília	0.71	0.71	13.202
16	São Francisco	Bom Jesus da Lapa	0.94	0.95	5.060
17	Corrente	Porto Novo	0.73	0.67	11.307
18	São Francisco	Morpará	0.93	0.86	14.003
19	Grande	Fazenda Macambira	0.80	0.82	-3.977
20	Grande	Boqueirão	0.78	0.73	-7.084
21	São Francisco	Sobradinho	0.83	0.67	25.472
22	São Francisco	Ibó	0.89	0.76	13.530
23	Pajeú	Floresta	-1.43	0.49	213.151
24	São Francisco	Itaparica	0.84	0.70	14.092
25	São Francisco	Paulo Afonso - Moxotó	0.89	0.76	0.972
26	São Francisco	Pão de Açúcar	0.99	0.98	-0.670
27	São Francisco	Foz	-	-	-

Na Figura 5.24 são apresentados os resultados da simulação em Três Marias, para o período de verificação. Nesta figura se nota que a maior parcela do aumento no erro de volume, mostrado na Tabela 5.6, se deve a diferenças nas vazões de estiagem. Observa-se que no período de verificação também ocorrem comportamentos suspeitos durante a estiagem das vazões afluentes, particularmente em 1995 e 1996. Tal comportamento não é encontrado nos postos de vazão observada, como se pode observar pela Figura 5.25. Isto indica que os erros elevados em Três Marias se devem a aumentos nos usos consuntivos e/ou inconsistências na determinação das vazões afluentes, calculadas por balanço hídrico do reservatório de Três Marias.

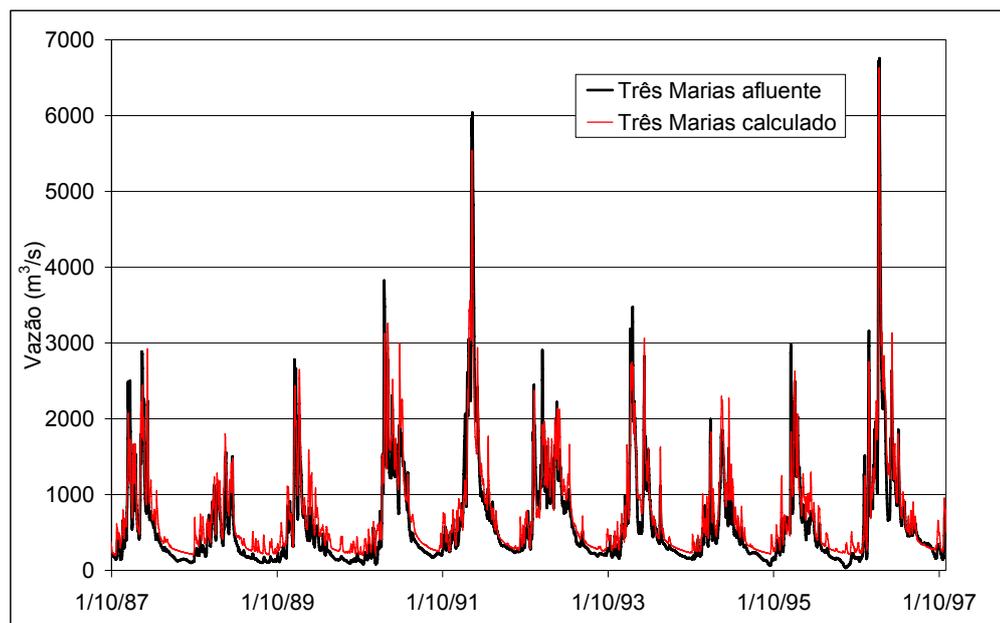


Figura 5.24: Hidrogramas calculado e observado do rio São Francisco afluentes ao reservatório da usina Três Marias, de outubro de 1987 a outubro de 1997 (período de verificação).

Na Figura 5.26 são mostrados os hidrogramas calculado e observado nos postos fluviométrico de Bom Jesus da Lapa e Morpará, no período de verificação. Nestas figuras se observa que o ajuste em Bom Jesus da Lapa é muito bom, praticamente mantendo o desempenho do período de calibração. Entretanto, em Morpará se observa que as vazões durante as estiagens estão bastante superestimadas pelo modelo, indicando que as inconsistências detectadas nas vazões observadas deste trecho (item 5.7.1.2) se devem, provavelmente, à problemas a jusante do posto Bom Jesus da Lapa.

A Figura 5.27 apresenta os hidrogramas de vazões calculadas e afluentes ao reservatório da usina de sobradinho, onde se observa que o modelo hidrológico superestima as vazões em todo o período. Nota-se uma grande superestimativa não somente das vazões no período de estiagem, mas também durante os períodos úmidos, com todos os picos de vazão sendo superestimados. Em razão dessas diferenças, o erro de volume passou de 18,62% na calibração para 25,47% durante a verificação.

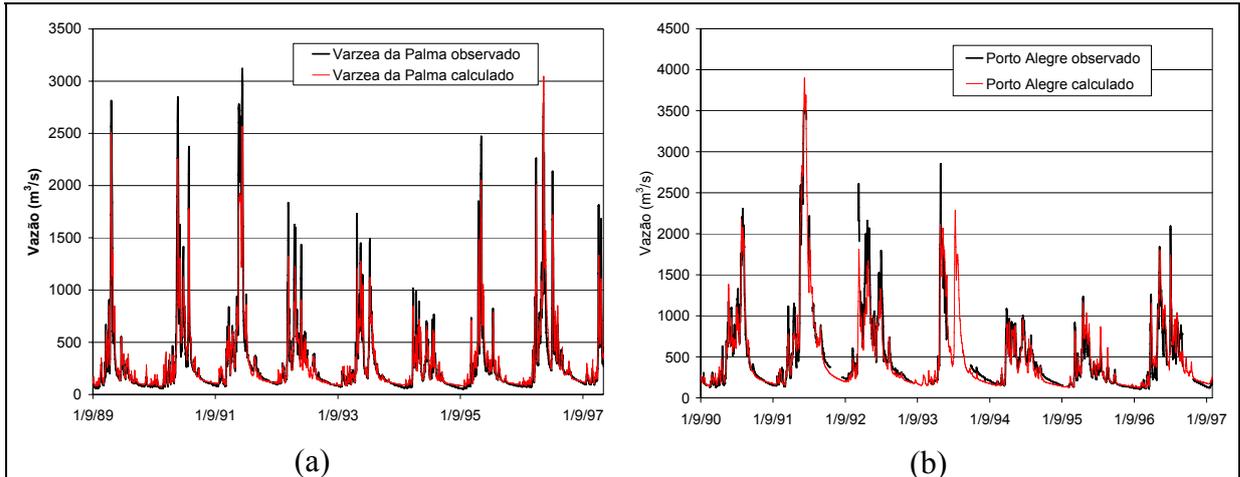


Figura 5.25: Hidrogramas calculado e observado no período de setembro de 1990 a setembro de 1997 (período de verificação): (a) rio das Velhas em Várzea da Palma e (b) rio Paracatu em Porto Alegre.

É importante notar que, em Morpará, o erro de volume no período de verificação é de 14,0%, o que é pouco mais da metade do erro em Sobradinho. Como a contribuição entre os dois locais é pequena, pode concluir que parte do erro de volume encontrado em Sobradinho se deve à vazão calculada a montante, que já apresenta erro em Morpará, e que parte do erro é devido à provável intensificação do uso consuntivo de água no período mais recente (1987 a 1997) ou à intensificação da evaporação.

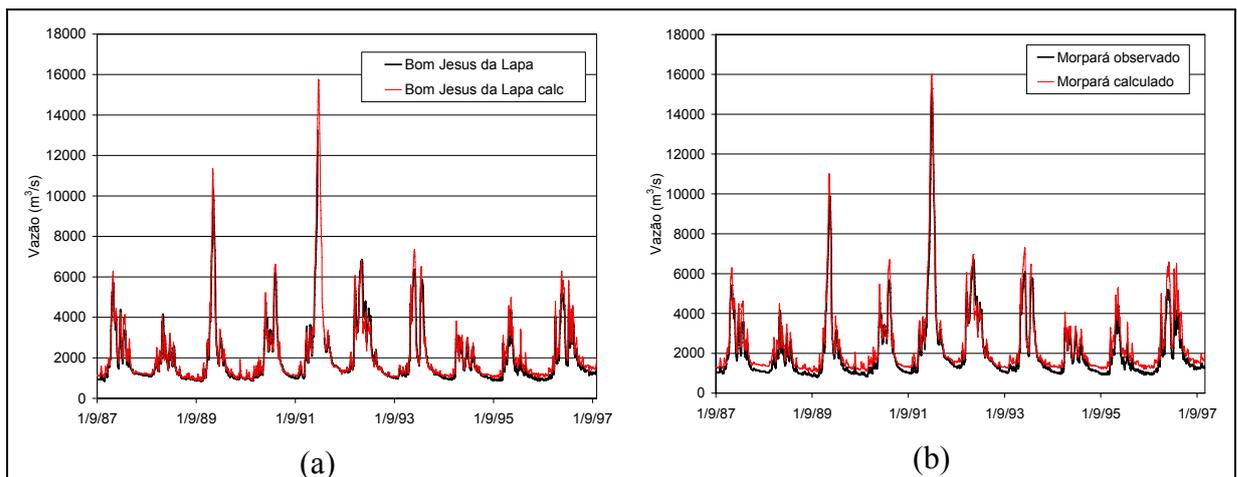


Figura 5.26: Hidrogramas calculado e observado do rio São Francisco de setembro de 1987 a setembro de 1997: (a) posto Bom Jesus da Lapa e (b) posto de Morpará.

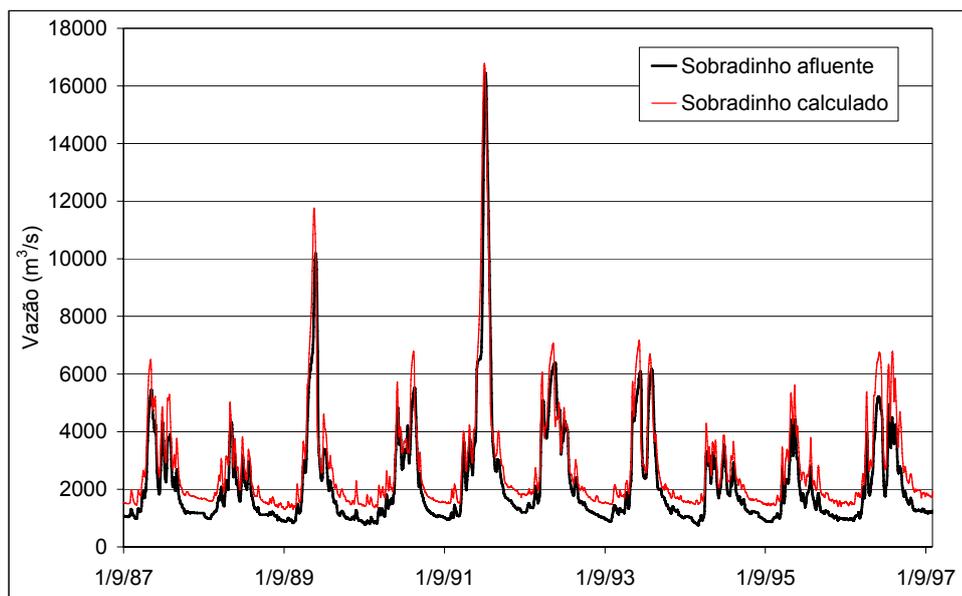


Figura 5.27: Hidrogramas calculado e observado do rio São Francisco afluentes ao reservatório de Sobradinho, de setembro de 1987 a setembro de 1997.

Os erros entre os valores calculados e observados em Morpará e Sobradinho são mostrados graficamente na Figura 5.28. Nestas figuras se observa que até o início de 1984 os erros em Morpará oscilavam em torno de zero, mas a partir de 1985 estes erros passam a oscilar em torno de aproximadamente $250 \text{ m}^3/\text{s}$ e alcançam a média de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ em 1996 e 1997. Em Sobradinho o comportamento dos erros é semelhante, sendo que a partir de 1982 os erros possuem um valor médio de aproximadamente $500 \text{ m}^3/\text{s}$, com um ligeiro crescimento em 1996. Ou seja, pode-se concluir que cerca de metade dos erros de simulação em Sobradinho são oriundos de erros no posto fluviométrico de Morpará. Outra informação importante é que as simulações indicam que as perdas de vazão entre Bom Jesus da Lapa e Morpará são maiores do que os $100 \text{ m}^3/\text{s}$, estimados através da comparação dos dados observados do trecho (Figura 5.16).

Na fase de verificação também foram avaliados os resultados gerados pelo modelo em termos de vazão natural. A vazão natural é definida como a vazão que passaria numa determinada seção do rio se não houvesse a influência dos reservatórios localizados a montante (regularização e evaporação) e se não houvesse os usos consuntivos. As séries de vazões naturais são utilizadas no planejamento da operação do SIN (Sistema Interligado Nacional) e foram recentemente revistas, utilizando dados de postos fluviométricos e de usinas hidrelétricas, e, em alguns casos, simulação chuva - vazão.

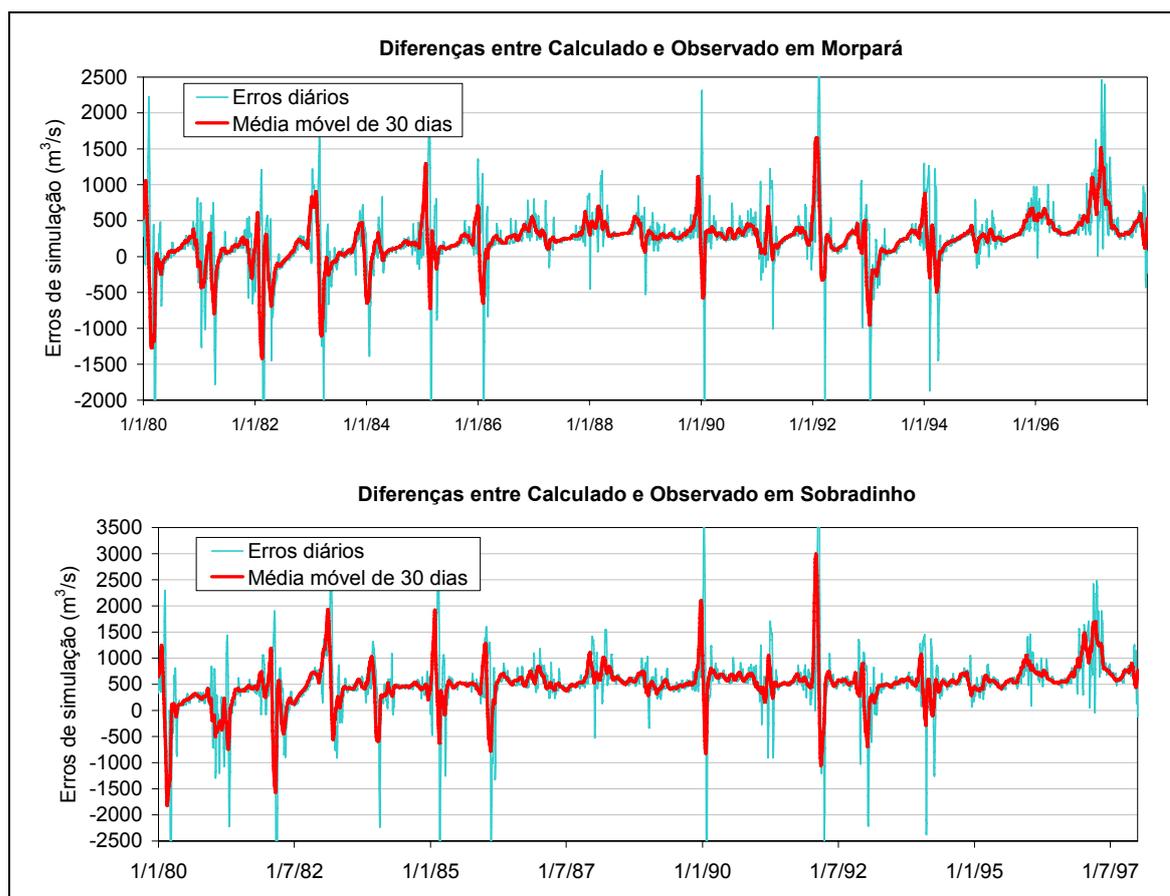


Figura 5.28: Diferenças entre vazões calculadas e observadas no rio São Francisco no posto Morpará e na usina de Sobradinho.

No modelo hidrológico as vazões naturais são geradas ignorando a presença dos reservatórios. Para isto não é mais realizada a substituição de vazões afluentes aos reservatórios calculadas pelas vazões defluentes observadas, como no caso da calibração. Todas as vazões geradas nas células são propagadas ao longo da rede de drenagem, e não são considerados os usos consuntivos.

Os erros médios apresentados na Figura 5.28, nos trechos entre Bom Jesus da Lapa e Sobradinho, foram introduzidos no modelo hidrológico como retiradas para usos consuntivos e outras perdas não-explicadas. Dessa forma, em pontos imediatamente a montante de Morpará e de Sobradinho feitas retiradas constantes de $250 \text{ m}^3/\text{s}$. Os resultados para o período de verificação são apresentados na Figura 5.29, incluindo um detalhe da cheia de 1992. Verifica-se que as inclusões dos valores constantes de perdas melhoraram significativamente o ajuste, tanto para valores máximos quanto mínimos. Os novos valores das funções objetivo para Morpará e Sobradinho são mostrados na Tabela 5.7, onde se constata que houve uma

redução muito significativa nas perdas de volume, que passaram de 14,0% para 2,1% em Morpará e de 25,5% para 3,3% em Sobradinho.

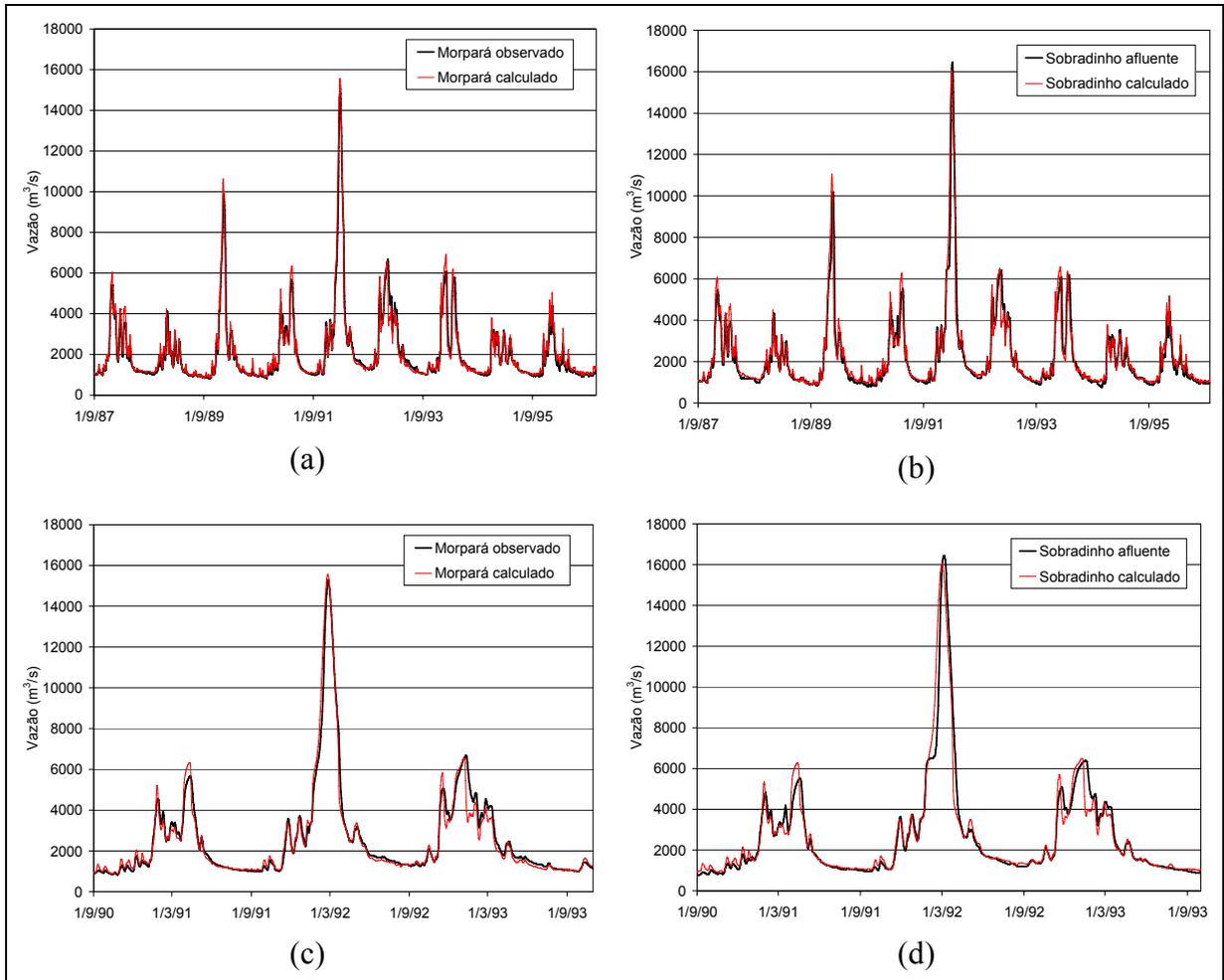


Figura 5.29: Hidrogramas calculados e observados no rio São Francisco após a inclusão de perdas constantes por usos consuntivos e valores não explicados: (a) e (b) Morpará e Sobradinho respectivamente, no período de verificação; (c) e (d) detalhe da cheia de 1992 em Morpará e Sobradinho, respectivamente.

Verificação com as vazões naturais

Na fase de verificação também foram avaliados os resultados gerados pelo modelo em termos de vazão natural. No modelo hidrológico as vazões naturais são geradas ignorando a presença dos reservatórios. Para isto não é mais realizada a substituição de vazões afluentes aos reservatórios calculadas pelas vazões defluentes observadas, como no caso da calibração. Todas as vazões geradas nas células são propagadas ao longo da rede de drenagem, e não são considerados os usos consuntivos.

No caso da usina de Três Marias, as diferenças entre a série de vazões afluentes, usadas para ajuste do modelo, e as vazões naturais é muito pequena. Embora os resultados tenham sido um pouco melhores, os mesmos são muito semelhantes aos obtidos durante a verificação, conforme pode ser visto na Tabela 5.8.

Para a usina de Sobradinho os resultados mostraram que, mesmo para as vazões naturais foi necessário manter as duas retiradas constantes de 250 m³/s no trecho entre Bom Jesus da Lapa e Sobradinho. Isto mostra que as perdas identificadas não se explicam pelo usos consuntivos, que são re-introduzidos nas séries de vazões naturais. Na Figura 5.30 são apresentados os hidrogramas calculados e “observados” de vazões naturais para Sobradinho, mostrando que o modelo representa muito bem estas vazões. Na Tabela 5.8 estão os resultados das funções objetivo, que mostram um excelente desempenho.

Tabela 5.7: Valores das funções objetivo em Morpará e Sobradinho, antes e após a introdução de perdas constantes no modelo hidrológico MGB-IPH

Local	Sem retiradas de perdas			Com retiradas de perdas		
	<i>NS</i>	<i>NS</i> _{log}	ΔV (%)	<i>NS</i>	<i>NS</i> _{log}	ΔV (%)
Morpará	0,93	0,86	14,003	0,96	0,96	2,09
Sobradinho	0,83	0,67	25,472	0,92	0,95	3,30

Tabela 5.8: Valores das funções objetivo em Três Marias e Sobradinho, comparando as vazões calculadas com as afluentes e as naturais.

Local	Vazões afluentes			Vazões naturais		
	<i>NS</i>	<i>NS</i> _{log}	ΔV (%)	<i>NS</i>	<i>NS</i> _{log}	ΔV (%)
Três Marias	0,85	0,72	20,46	0,86	0,78	17,05
Sobradinho	0,92	0,95	3,30	0,94	0,95	-1,78

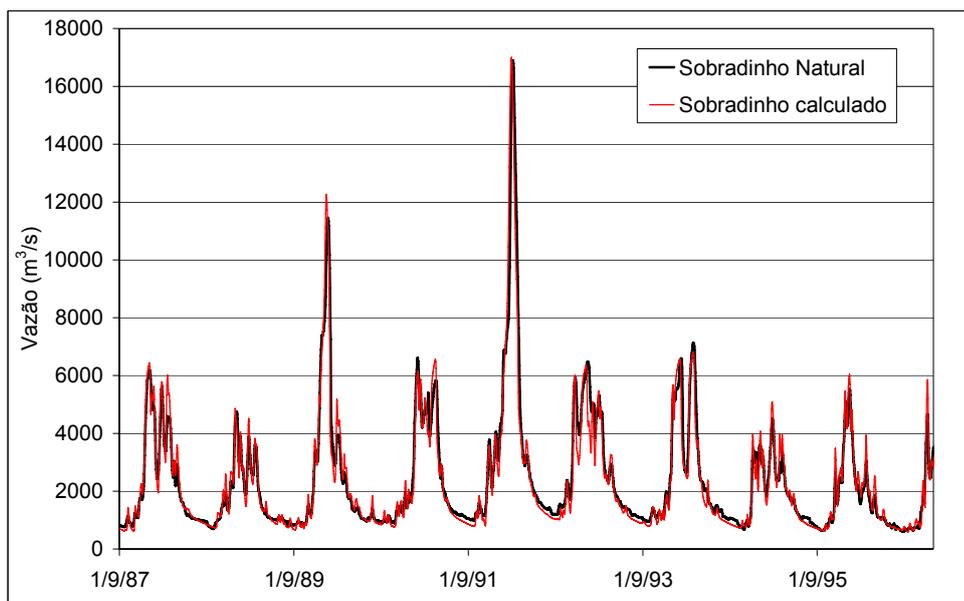


Figura 5.30: Hidrogramas de vazões naturais calculadas e observadas do rio São Francisco na usina de Sobradinho, período de setembro de 1987 a dezembro de 1996.

5.8 Resumo do Capítulo

Os dados meteorológicos e hidrológicos disponíveis na bacia apresentam distribuição temporal e espacial suficiente para o ajuste adequado do modelo hidrológico, embora apresente deficiências importantes na região semi-árida do médio São Francisco. Por esse motivo, a bacia do São Francisco foi separada em duas regiões com diferentes resoluções: das nascentes do rio São Francisco até a foz do rio Urucuia (inclusive) são utilizadas células de 0,1 grau (aproximadamente 10 km) e para o restante da bacia são usadas células de 0,2 grau (aproximadamente 20 km).

Os dados físicos obtidos para a bacia são de boa qualidade, e possibilitaram determinar os mapas de grupos de tipos de solos e grupos de uso do solo e cobertura vegetal adequados às necessidades do modelo.

Foi constatado que, em anos recentes as vazões observadas e naturais apresentam problemas de continuidade nos trechos entre os postos fluviométricos Bom Jesus da Lapa e Morpará e entre esse último e a usina de Sobradinho. Para essa pesquisa, tais problemas foram tratados como perdas não explicadas, e contornados através de retiradas constantes de 250 m³/s em ambos os trechos.

O modelo hidrológico foi calibrado para toda a bacia do rio São Francisco, utilizando-se os dados observados do período 1977 a 1986, sendo que o período de 1986 a 1996 foi utilizado na sua verificação. Os resultados mostraram que o modelo apresenta bom desempenho para representar tanto as vazões observadas no postos fluviométricos, quanto as vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos.

6 PREVISÕES DE VAZÃO DE CURTO PRAZO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

6.1 Previsões de Precipitação de Curto Prazo do Modelo ETA

A região abrangida pelas previsões é definida pelas seguintes coordenadas: latitude mínima 22 S; latitude máxima: 6 S; longitude mínima: 49 W; e longitude máxima: 36 W. Os dados do modelo ETA foram disponibilizados pelo CPTEC/INPE em uma grade de pontos distanciados de 0,40 graus de latitude e longitude (aproximadamente 40x40 km), mostrados na Figura 6.1.

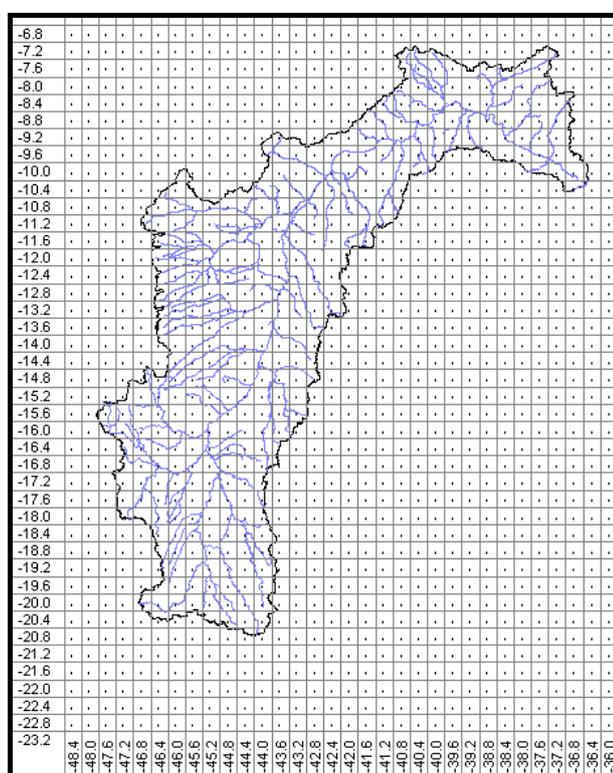


Figura 6.1: Pontos de grade do modelo ETA de resolução 0,4 graus, sobre os limites da bacia do rio São Francisco.

Foram disponibilizados arquivos de dados de previsão de precipitação do modelo ETA para o período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003. Estes arquivos foram cedidos pelo ONS, que está realizando um projeto de análise e comparação de modelos de previsão de vazão com base na previsão de precipitação.

Os arquivos do modelo ETA correspondem às previsões de periodicidade semanal, que iniciam sempre às quartas-feiras. O horizonte de previsão é de 10 dias, iniciando sempre na quarta-feira de uma semana (inclusive) e terminando na sexta-feira da semana seguinte (inclusive). Os dados referem-se às chuvas acumuladas em períodos de 24 horas, definidos pelas 12:00 Z de um dia até às 12:00 Z do dia seguinte, onde Z refere-se ao horário no meridiano de Greenwich. Considerando o horário oficial de Brasília, às 12:00 Z correspondem às 9:00 local, que é o horário em que são lidos, normalmente, os pluviômetros.

6.2 Avaliação das Previsões de Precipitação do Modelo ETA

Para análise e comparação das previsões de chuva com os valores observados, ambos os dados foram interpolados para os pontos de grade do modelo hidrológico. Como exemplo, a Figura 6.2 apresenta os valores interpolados para a chuva observada no dia 08/11/2000 (Figura 6.2b) e a previsão para essa mesma chuva (Figura 6.2a), realizada no dia 07/11/2000, ou seja, com um dia de antecedência.

O processo de interpolação foi repetido para todas as previsões disponíveis nos anos de 1996 a 2003, e os dados foram analisados isoladamente (valores diários), bem como os totais acumulados ao longo de N dias, onde N variou entre 1 e 10 dias, que corresponde ao horizonte máximo da previsão.

Para facilitar a avaliação das previsões, foram determinadas precipitações médias (previstas e observadas) sobre as áreas das seguintes sub-bacias (Figura 6.3): *a*) rio São Francisco até Três Marias; *b*) rio Paracatu até o posto fluviométrico Porto Alegre; *c*) rio São Francisco até o posto fluviométrico São Francisco (essa bacia contém as duas primeiras); *d*) rio Grande até o posto fluviométrico Boqueirão; *e*) rio São Francisco até Sobradinho (essa bacia contém as anteriores) e *e*) para a bacia inteira, até a foz. Destaca-se que foram escolhidas as sub-bacias do rio Paracatu e rio Grande por serem importantes contribuintes da

região do Médio São Francisco, podendo influenciar o comportamento das previsões para a usina de Sobradinho.

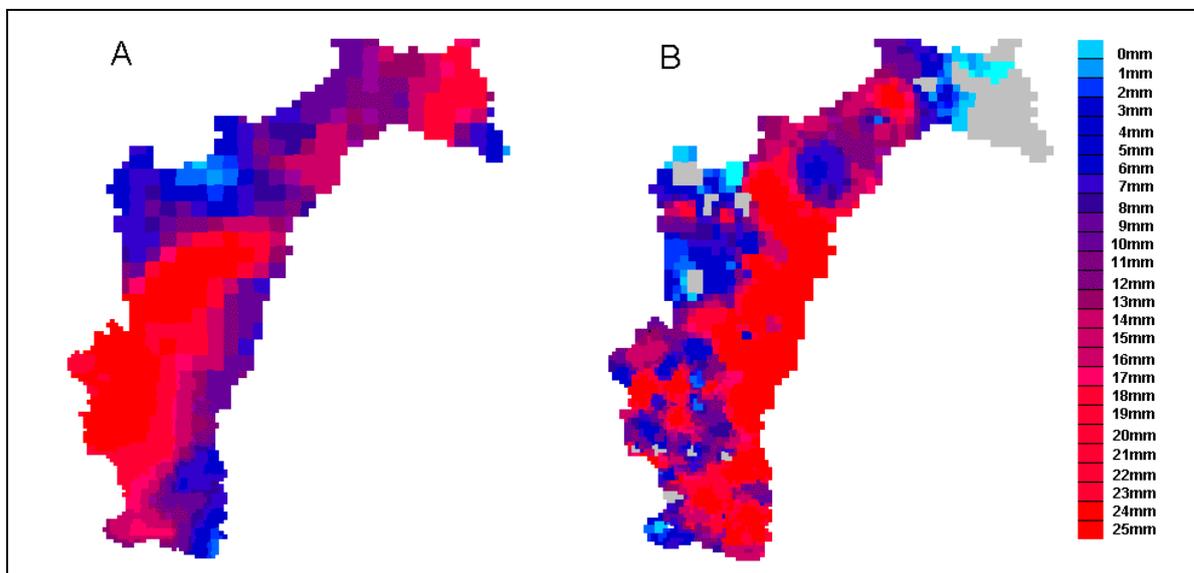


Figura 6.2: Precipitação interpolada para a grade do modelo hidrológico na bacia do rio São Francisco. Sendo: (A) prevista pelo modelo ETA; (B) observada. (previsão para o dia 08/11/2000 realizada no dia 07/11/2000).

A Figura 6.4 apresenta as séries temporais de chuvas observadas e previstas com 1 dia de antecedência na bacia do rio São Francisco até as usinas de Três Marias e Sobradinho, no período de julho de 1996 a julho de 1998. Nessa figura se nota que, embora as previsões do modelo ETA apresentem alguns dias de forte sub e superestimativa, o comportamento geral das precipitações nos períodos úmidos e secos é bem representado.

A Figura 6.5a apresenta os mesmos dados comparados diretamente, em um gráfico de correlação. Nessa figura, a linha tracejada representa o que seria uma previsão perfeita e os pontos pretos representam as previsões reais. Observa-se que os pontos da previsão real se afastam bastante da linha da previsão perfeita, com freqüentes superestimativas da chuva (pontos acima da linha tracejada) e, também, vários dias de elevada chuva observada com pouca chuva prevista (subestimativas). A Figura 6.5b apresenta resultados semelhantes para a bacia do rio São Francisco até Sobradinho, onde se observa que a previsão de chuva média tem erros inferiores à bacia de Três Marias. Ou seja, de maneira geral, observa-se que o desempenho das previsões é melhor quando analisadas em áreas maiores, como a bacia até Sobradinho.

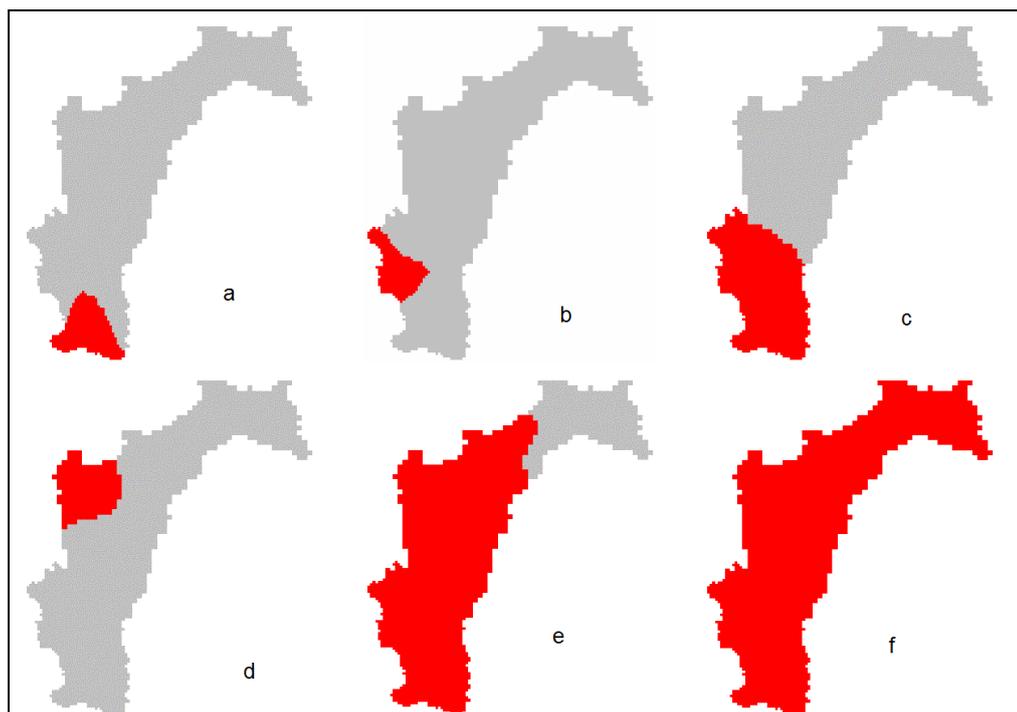


Figura 6.3: Regiões analisadas quanto às previsões de chuva dos modelo atmosféricos: a) bacia do rio São Francisco até Três Marias; b) bacia do rio Paracatu até Porto Alegre; c) bacia do rio São Francisco até São Francisco; d) bacia do rio Grande até Boqueirão; e) bacia do rio São Francisco até Sobradinho; f) bacia do rio São Francisco até a foz.

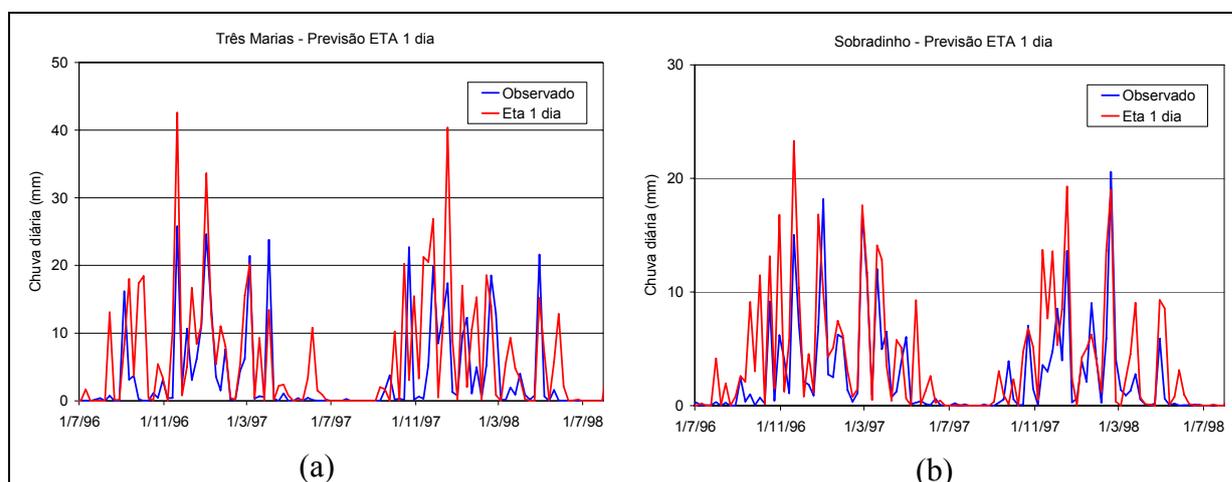


Figura 6.4: Comparação entre as chuvas previstas pelo modelo ETA e observadas. Valores médios para a bacia do rio São Francisco até (a) Três Marias e até (b) Sobradinho, com 1 dia de antecedência. Período de julho de 1996 a julho de 1998.

A qualidade das previsões foi avaliada para cada bacia e para cada tempo de antecedência através do cálculo do coeficiente de correlação (Equação 6.1). A Figura 6.6

apresenta os coeficientes de correlação para cada sub-bacia e para cada antecedência das previsões, de 1 dia a 10 dias. Observa-se que as correlações mais altas ocorrem nas bacias maiores, visto que o cálculo da chuva média sobre uma área mais extensa é capaz de filtrar com maior intensidade os erros locais, que geralmente têm maior amplitude. Além disso, observa-se que o primeiro dia da previsão (antecedência = 1 dia) não é o que apresenta a maior correlação, ao contrário do que se esperaria.

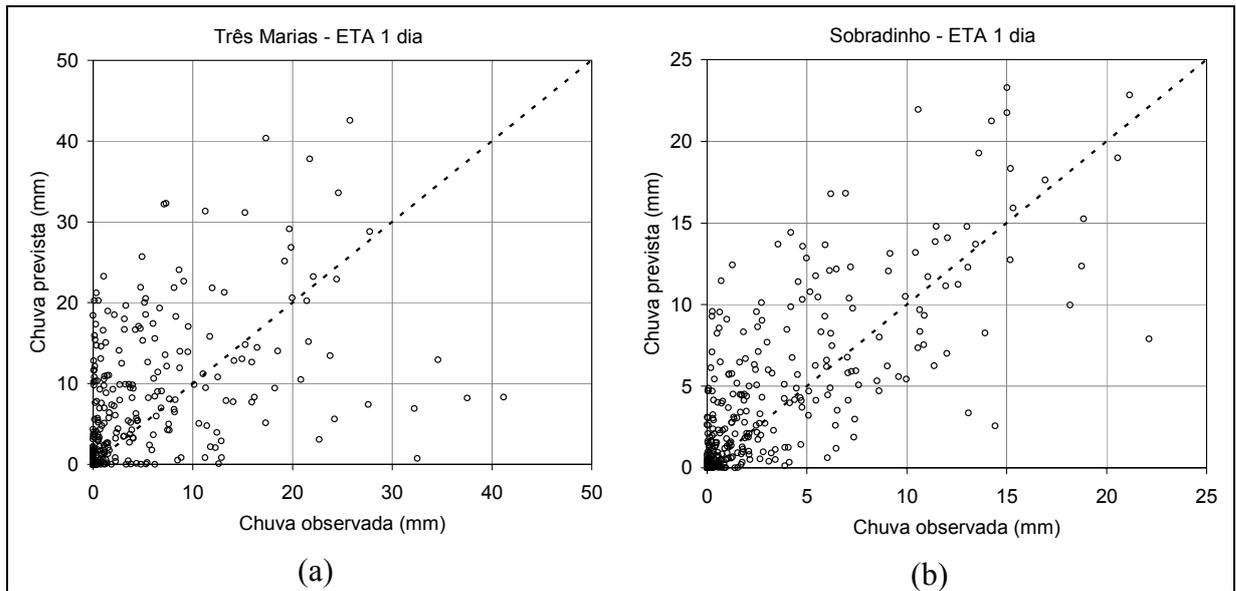


Figura 6.5: Correlação entre chuvas observadas e previstas pelo modelo ETA na bacia do rio São Francisco (a) até Três Marias e (b) até Sobradinho, com 1 dia de antecedência.

$$r = \frac{\sum \left[\left(P_{obs} - \overline{P_{obs}} \right) \cdot \left(P_{prev} - \overline{P_{prev}} \right) \right]}{\sqrt{\sum \left(P_{obs} - \overline{P_{obs}} \right)^2 \cdot \sum \left(P_{prev} - \overline{P_{prev}} \right)^2}} \quad (6.1)$$

onde: P_{obs} são os valores observados; $\overline{P_{obs}}$ é a média dos valores observados; P_{prev} são os valores previstos e $\overline{P_{prev}}$ é a média dos valores previstos.

No caso da bacia de Três Marias, por exemplo, o dia que apresenta a melhor correlação é o terceiro, enquanto na bacia do rio Paracatu é o quinto. Em todas as sub-bacias o desempenho das previsões cai a partir do quarto ou quinto dia, entretanto, no caso da bacia do rio Grande, da bacia até Sobradinho e bacia inteira, o coeficiente de correlação apresenta uma elevação a partir do sétimo dia.

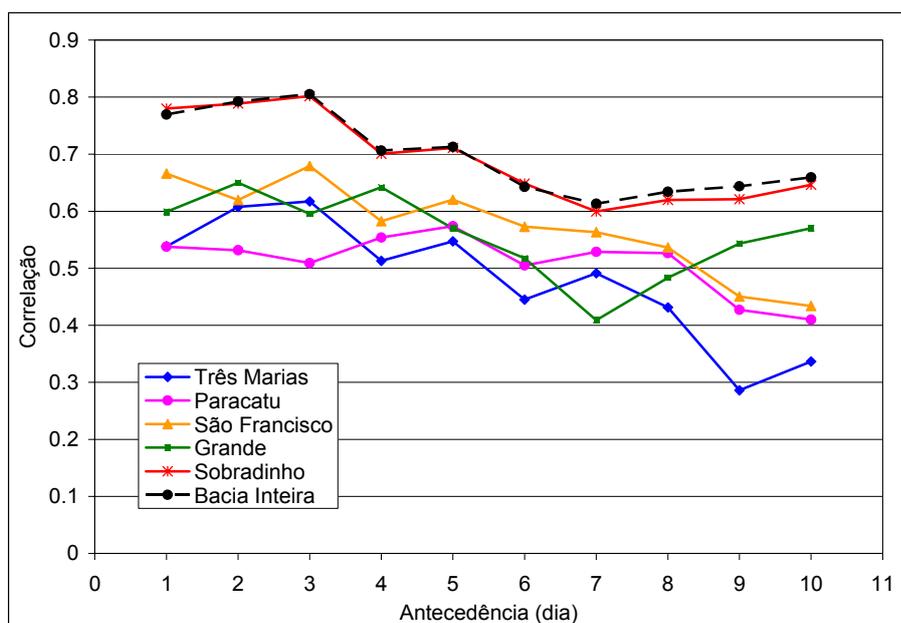


Figura 6.6: Coeficientes de correlação entre as chuvas previstas e observadas médias para as diferentes sub-bacias da bacia do rio São Francisco.

As mesmas análises de correlação entre chuvas observadas e previstas foram realizadas considerando os valores totais acumulados em intervalos de 1 a 10 dias. A Figura 6.7 apresenta as chuvas previstas e observadas na bacia do rio São Francisco até Três Marias e Sobradinho, acumuladas dos 7 primeiros dias.

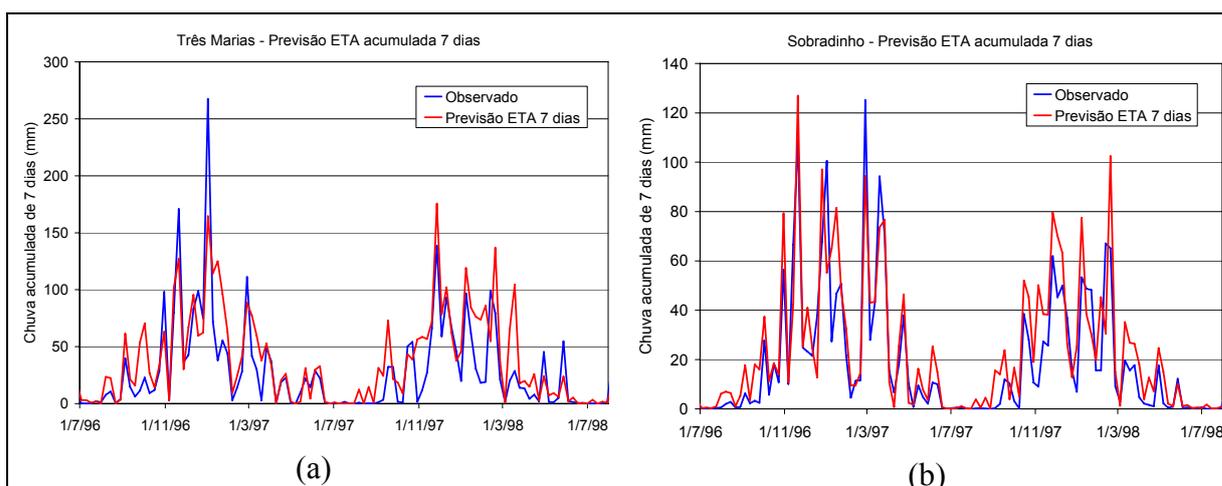


Figura 6.7: Comparação entre as chuvas previstas pelo modelo ETA e observadas. Valores acumulados dos 7 primeiros dias da previsão, médios para a bacia do rio São Francisco até Três Marias.

Observa-se que esses resultados são melhores do que os apresentados na Figura 6.4, que apresentam chuvas previstas com apenas 1 dia de antecedência. Na Figura 6.7 é interessante observar que as previsões melhoram bastante no período do verão, em que a variabilidade da chuva é grande. Os primeiros eventos chuvosos do final da época seca também são bem previstos.

A Figura 6.8 apresenta os gráficos de correlação entre chuvas acumuladas observadas e previstas para os horizontes de 3 e 7 dias. Observa-se nesta figura que, o modelo ETA apresenta uma tendência de superestimativa da precipitação acumulada para o horizonte de 3 dias, em ambas as sub-bacias, mas com maior evidência em Sobradinho. Entretanto, de maneira geral, os gráficos mostram que os valores acumulados reduzem a dispersão em relação a previsão perfeita (linha tracejada).

A Figura 6.9 apresenta os coeficientes de correlação das chuvas acumuladas para cada sub-bacia considerada e para cada horizonte das previsões, de 1 dia a 10 dias. Observa-se que o coeficiente de correlação aumenta em todas as bacias até o horizonte de 4 ou 5 dias e, a partir daí, mantém-se aproximadamente constante ou reduzindo um pouco após o horizonte de 8 dias. Esse comportamento sugere uma incoerência, pois aumentando a antecedência melhoram os resultados. No entanto, a medida que os valores de acumulam, os erros individuais de cada dia são minimizados pela soma de todos os dias em um dado horizonte. Novamente, os valores mais altos ocorrem nas bacias maiores, conforme já esperado.

Para avaliar a ocorrência de erros sistemáticos foram calculados os erros médios (EM , Equação 6.2) para cada previsão de chuva acumulada em 10 dias, em cada uma das bacias. Os resultados mostram que os erros são relativamente baixos, conforme mostra a Tabela 6.1. Os erros estão em mm, o que significa que, no caso da bacia de Três Marias, o erro médio é de 10,97 mm em 10 dias. Observa-se que a previsão do modelo ETA superestima a chuva nas bacias localizadas mais ao sul (Três Marias, Paracatu e São Francisco) e subestima nas bacias localizadas mais ao norte (Grande), mas na bacia inteira, ou até Sobradinho, não são observados erros sistemáticos.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{prev} - P_{obs}) \quad (6.2)$$

Onde: n é número de previsões; P_{prev} é o valor previsto e P_{obs} é o valor observado.

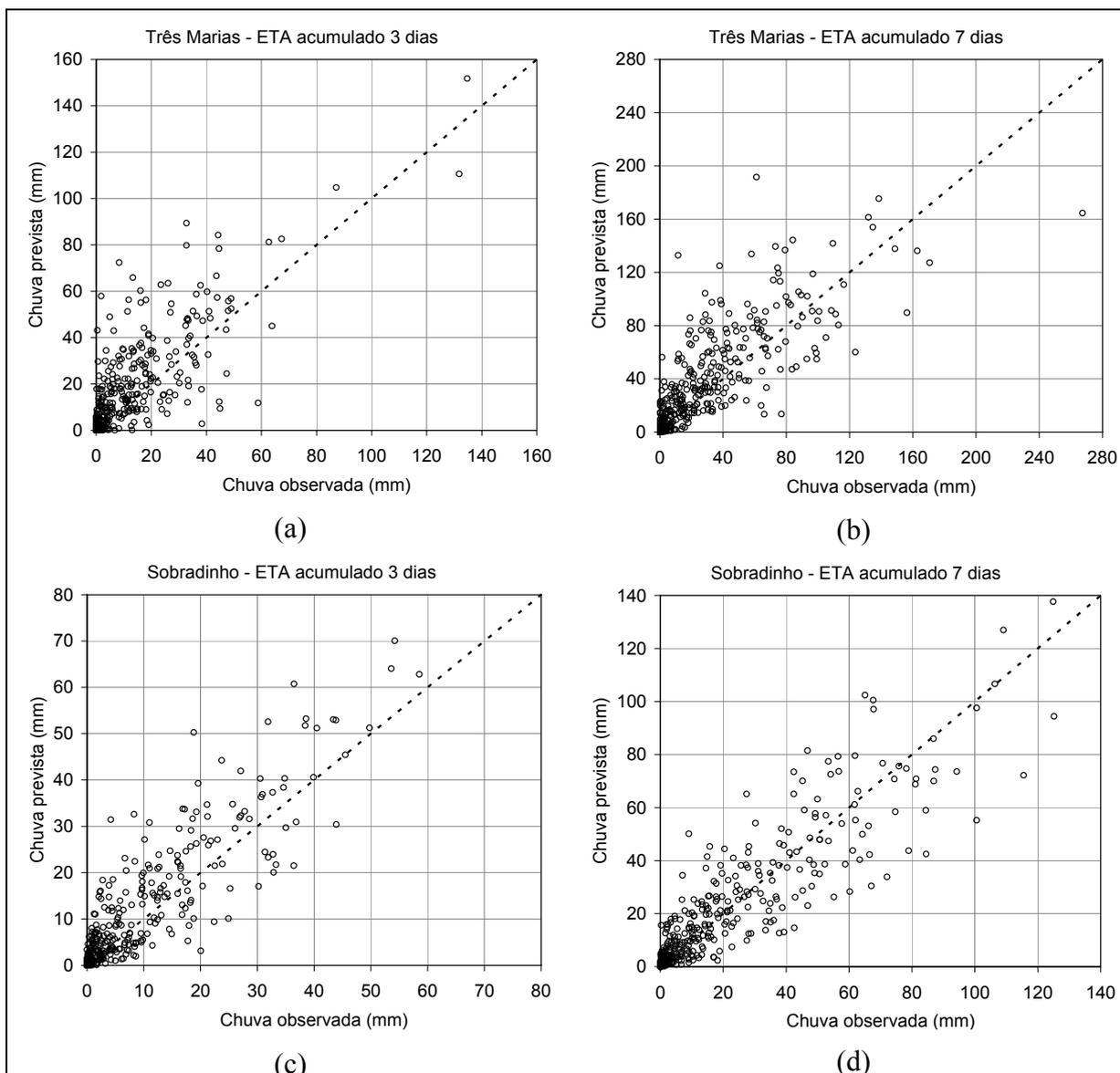


Figura 6.8: Correlações entre chuvas acumuladas observadas e previstas para horizontes de 3 e 7 dias nas bacias de Três Marias e Sobradinho (a linha tracejada indica a previsão perfeita).

6.3 Previsão de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco

Neste item são apresentados resultados das previsões de curto prazo com o modelo hidrológico, utilizando as previsões de chuva do modelo regional ETA. As previsões de chuva disponíveis para a previsão de curto prazo têm horizonte de 10 dias. Nos itens anteriores deste capítulo estas previsões foram analisadas frente às chuvas observadas, considerando valores médios na bacia do rio São Francisco até a foz, na bacia do rio São Francisco até Sobradinho, na bacia do rio São Francisco até São Francisco e até Três Marias. Adicionalmente, os valores

previstos foram comparados aos observados na bacia do rio Paracatu até Porto Alegre e na bacia do rio Grande até o posto fluviométrico Boqueirão.

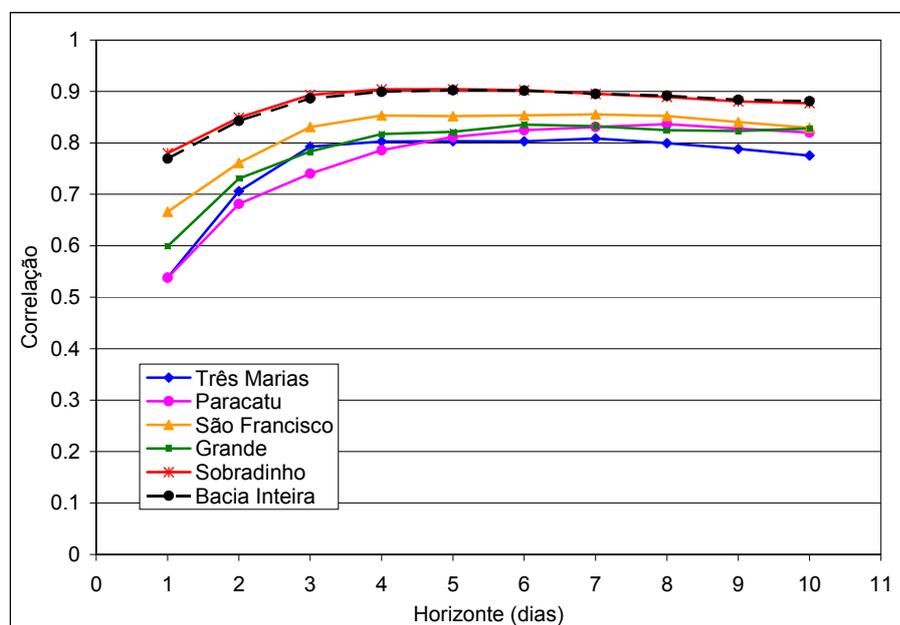


Figura 6.9: Coeficientes de correlação entre as chuvas acumuladas observadas e previstas para diferentes horizontes de previsão e diferentes sub-bacias.

Tabela 6.1: Erros médios das previsões de chuva acumulada de 10 dias médias nas diferentes sub-bacias do rio São Francisco.

Bacia	Erro médio (mm)
Três Marias	10.97
Paracatu	7.30
São Francisco	7.47
Grande	-7.65
Sobradinho	0.25
São Francisco até a foz	-0.34

A metodologia de previsão de vazão de curto prazo foi baseada no uso do modelo hidrológico, utilizando dados de chuva observada e prevista, de forma semelhante como seria possível realizar operacionalmente, desde que houvesse transmissão dos dados de chuva em tempo real, ou a cada dia.

Os dados observados de chuva nos postos pluviométricos foram utilizados como dados de entrada para o modelo hidrológico até o dia anterior ao início da previsão. A partir do primeiro dia da previsão foram utilizados os dados de previsão de chuva do modelo ETA, até

o décimo dia de previsão. A partir do décimo primeiro dia de previsão considerou-se que a chuva é nula em todas as bacias. Dados de vazão observada em diferentes postos fluviométricos também foram utilizados para o procedimento de atualização do modelo hidrológico.

As previsões foram iniciadas sempre as quartas feiras, estendendo se por duas semanas para Três Marias e por quatro semanas para a Sobradinho. A Figura 6.10 apresenta um exemplo de uma previsão de 14 dias para o reservatório de Três Marias. Para comparação, a figura apresenta, também, as vazões naturais e as vazões previstas considerando chuva nula a partir do primeiro dia de previsão, e a previsão de vazão baseada na chuva observada que, embora não seja possível de ser obtida operacionalmente, é importante de ser calculada para efeitos de comparação, pois pode ser considerada como a “previsão perfeita” de chuva.

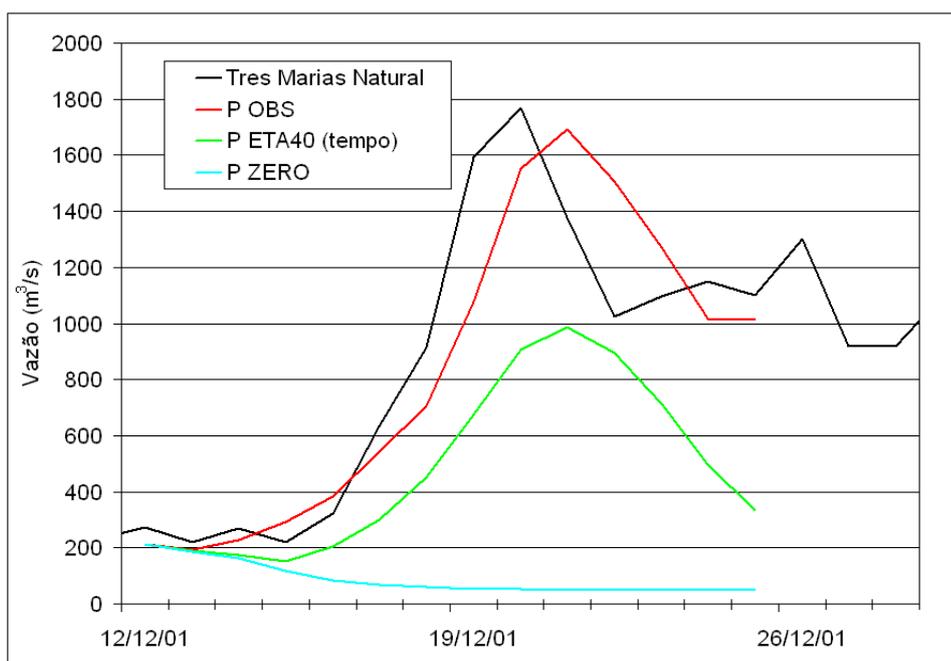


Figura 6.10: Exemplo do previsão de vazão natural em Três Marias com horizonte de 14 dias, com início no dia 12/12/2001 e final no dia 25/12/2001 (linha preta: vazão natural; linha azul: vazão prevista considerando chuva zero; linha vermelha: vazão prevista com base na chuva observada; linha verde: vazão prevista com base na chuva prevista pelo modelo ETA – 10 dias).

Na Figura 6.10 se observa que, mesmo a previsão usando chuva observada apresenta erros, que devem a imperfeições inerentes ao ajuste do modelo hidrológico e a perda da

influência das condições iniciais, nos maiores horizontes. Também se nota que, a previsão usando chuva zero desde o início da previsão produz erros muito elevados, principalmente quando realizada próxima do ponto de subida do hidrograma. Isto se deve a baixa memória da bacia, ou seja, o tempo de concentração da bacia contribuinte não excede a dois ou três dias, no caso de três Marias. Quando se utiliza a chuva prevista pelo modelo ETA, a previsão das vazões pode melhorar significativamente, comparando-se com o caso de chuva nula desde o início da previsão. No caso do exemplo da Figura 6.10, a previsão com o modelo ETA produz uma subestimativa mas, ainda assim, permitiu obter uma representação razoável do hidrograma. Em outros casos, essa previsão poderá produzir superestimativa ou mesmo ser perfeita, dependendo do desempenho do modelo ETA em prever a chuva.

6.3.1 Resultados de previsão de vazão de curto prazo em Três Marias

Para que se possa realizar uma avaliação comparativa do desempenho do modelo ETA/MGB, com os resultados normalmente obtidos com os modelo do ONS, as previsões diárias foram transformadas em vazões médias semanais, seguindo os formatos adotados pelo ONS. A Figura 6.11 apresenta as vazões previstas pelos modelos com antecedência constante de uma semana, no períodos dos anos de 1996 a 2003. Para facilitar a análise, o gráfico da Figura 6.11 foi dividido em seis períodos, destacados na Figura 6.12. Destaca-se que nesta figura são apresentadas as vazões naturais (linha preta), as previsões com base na chuva observada (linha vermelha) e as previsões usando a chuva prevista pelo modelo ETA.

Observa-se na Figura 6.12 que a vazão prevista com a chuva observada (linha vermelha) acompanha muito bem as variações do hidrograma natural (linha preta). Alguns dos maiores picos são subestimados, como em janeiro de 1997, outros são superestimados, como em janeiro de 2003, mas o comportamento geral é muito bom durante os períodos chuvosos. Durante os períodos de estiagem o modelo se comporta muito bem, embora existam algumas superestimativas, principalmente nos últimos anos (2002 e 2003).

Para previsões com base na chuva prevista pelo modelo ETA (linha verde), o desempenho geral é muito bom com uma semana de antecedência (Figura 6.12). Nota-se que essas previsões acompanham de forma muito próxima a previsão com chuva observada (linha vermelha), indicando que a chuva prevista pelo modelo ETA é muito boa sobre a bacia contribuinte a Três Marias, para uma semana de antecedência. Os maiores picos são muito

bem representados, com algumas sub e superestimativas, sendo o verão de 2000/2001 o período que apresenta as maiores discrepâncias com a vazão natural observada.

Na Figura 6.13 são apresentados detalhes das previsões com uma semana de antecedências, onde se observa que a vazão prevista com base nas previsões de chuva do modelo ETA superestimam as vazões observadas em diversas semanas, entretanto, durante o mês de dezembro, quando há um forte crescimento da vazão, estas previsões mostram um desempenho muito bom, indicando corretamente, por exemplo, que a vazão passaria de cerca de 400 m³/s para cerca de 1400 m³/s, em dezembro de 2002. Esse tipo de variação normalmente não é bem previsto por modelos estocásticos vazão-vazão, semelhantes ao PREVIVAZ usado pelo ONS.

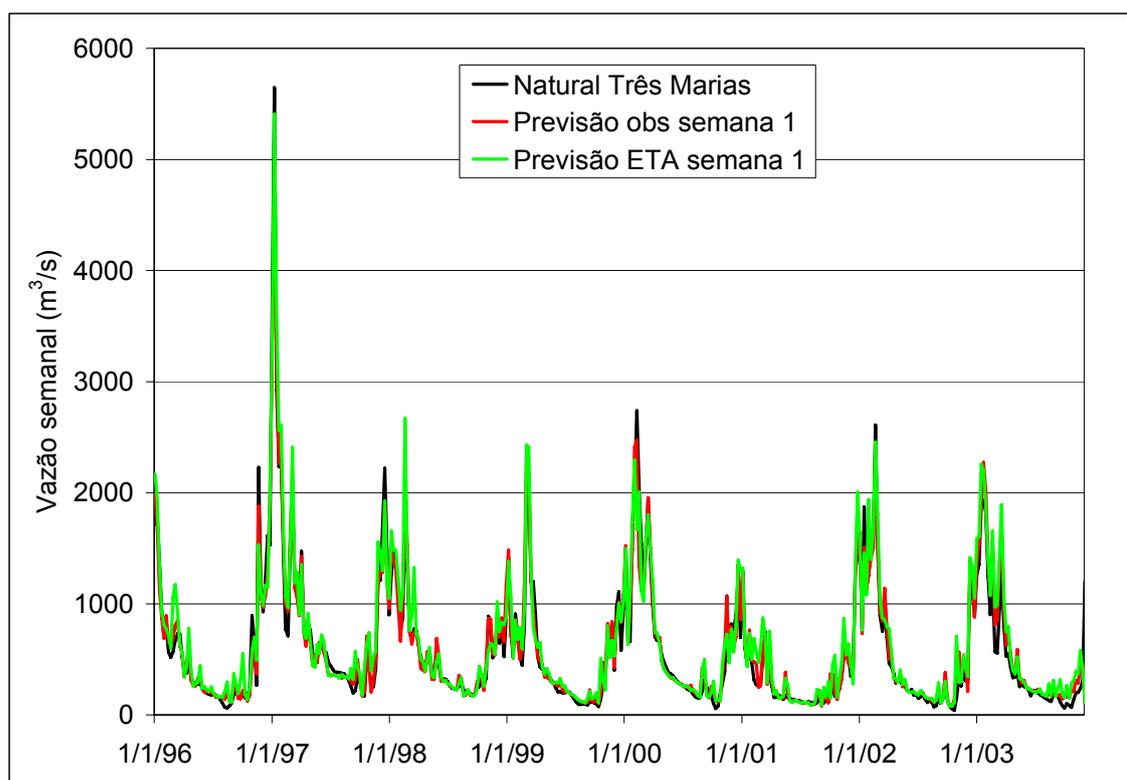


Figura 6.11: Previsões de vazão semanal com uma semana de antecedência para Três Marias (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha vermelha: previsão de vazão baseada na chuva observada).

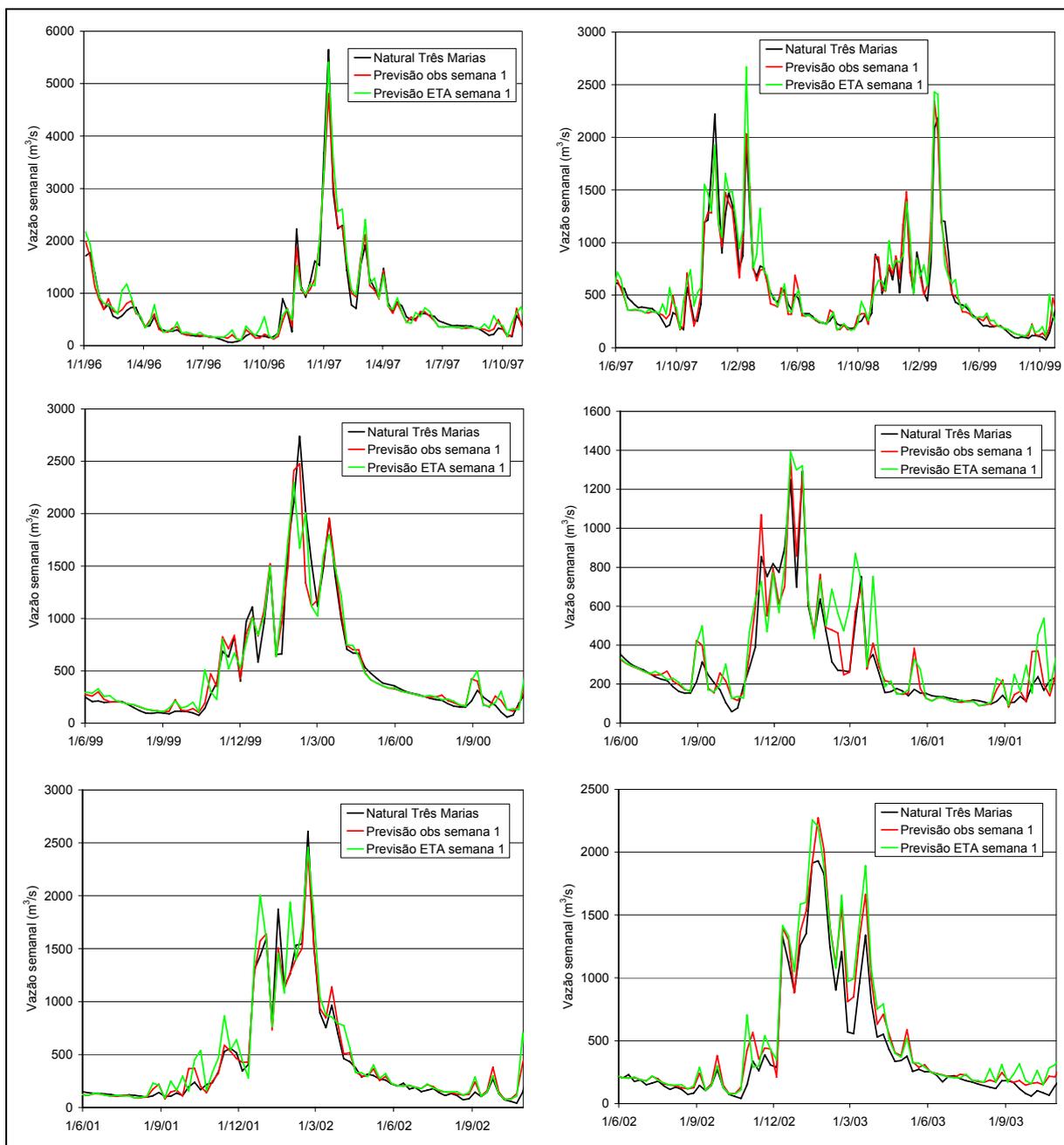


Figura 6.12: Previsões de vazão semanal com uma semana de antecedência para Três Marias no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003 (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha vermelha: previsão de vazão baseada na chuva observada).

Para antecedência de duas semanas a qualidade das previsões tende a cair um pouco. A Figura 6.14 apresenta as vazões previstas pelos modelos com 2 semanas de antecedência nos anos de 1996 a 2003. Nesta figura se observa que ocorre uma piora na previsão das vazões do período úmido, com erros de maior amplitude e atraso de alguns picos.

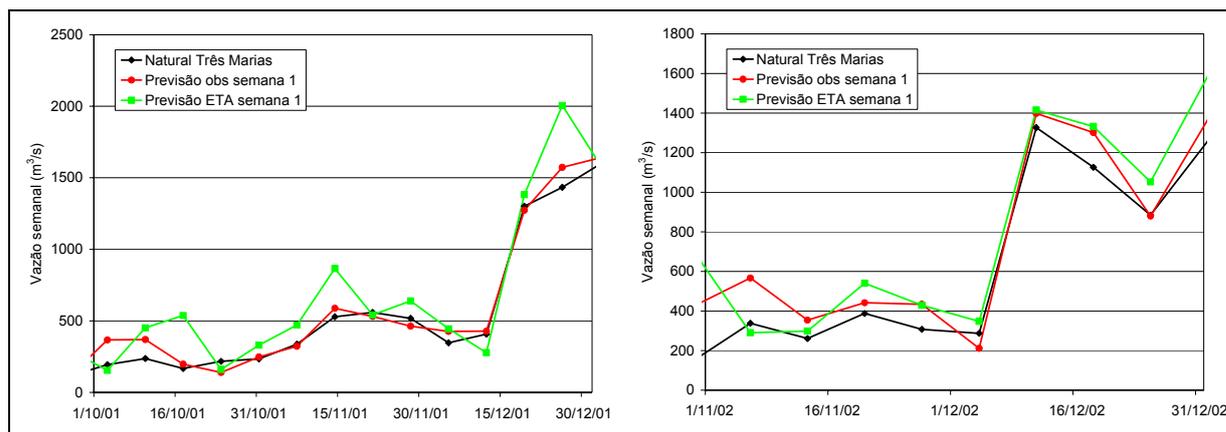


Figura 6.13: Previsões de vazão semanal com uma semana de antecedência para Três Marias, com detalhe para o desempenho do modelo nas fortes subidas do hidrogramas nos meses de dezembro de 2001 e 2002.

As vazões das semanas dos meses de estiagem, por outro lado, são muito bem previstas. Esse resultado é esperado porque se considerou chuva nula a partir do décimo dia de previsão, logo as previsões baseadas no modelo ETA tendem a serem melhores no período de recessão dos hidrogramas, quando a quantidade de chuva reduziu, ou mesmo terminou. Na subida dos hidrogramas, quando chove mais, se a chuva ocorreu após o décimo dia, o erro será grande, pois se considerou chuva igual a zero.

Na Figura 6.15, nota-se que, apesar da inclusão de chuva nula a partir do décimo dia de previsão, a vazão prevista com base nas previsões de chuva do modelo ETA superestimam as vazões observadas em diversas semanas, entretanto, estas previsões mostram um desempenho que ainda pode ser considerado bom, na estimativa do forte crescimento da vazão no mês de dezembro.

Para avaliação da qualidade das previsões foram utilizadas, além da análise gráfica, as seguintes estatísticas: o erro médio (EM), o erro médio absoluto – EMA (Equação 6.3), o erro médio relativo – EMR (Equação 6.4) e o coeficiente de persistência – RD (Equação 6.5). O coeficiente RD avaliar o benefício da previsão em relação a alternativa de simplesmente usar o último valor observado. As estatísticas das previsões de vazão para as antecedências de uma a quatro semanas em Três Marias são apresentados na Figura 6.16.

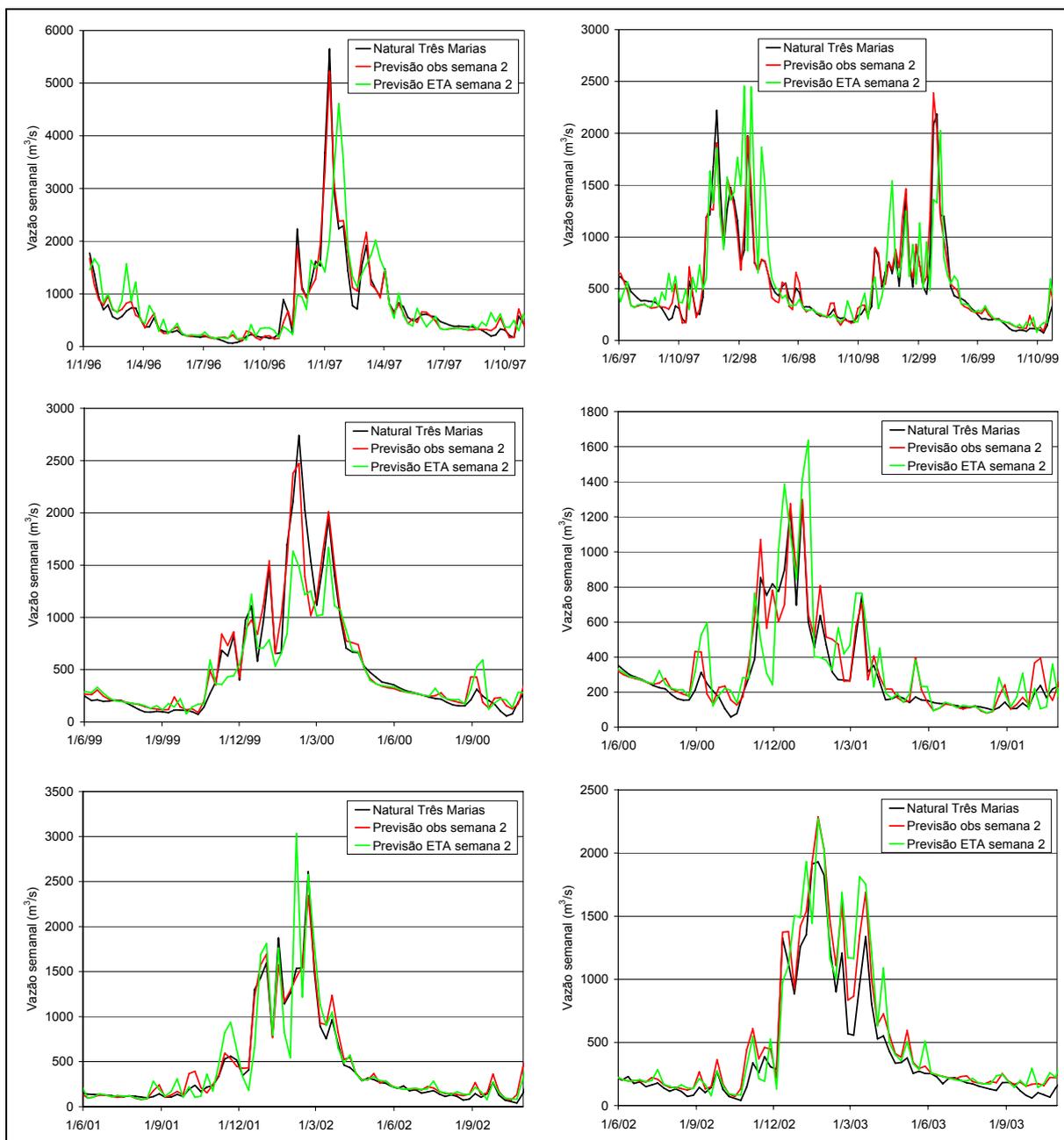


Figura 6.14: Previsões de vazão semanal com duas semanas de antecedência para Três Marias no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003 (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha vermelha: previsão de vazão baseada na chuva observada).

Observa-se na Figura 6.16a que as previsões em Três Marias usando chuva observada (colunas vermelhas) mostram uma tendência de superestimativa das vazões, que se explica devido às diferenças observadas no ajuste do modelo MGB (Capítulo 4), que tende a superestimar as vazões nos anos mais recentes. Utilizando a chuva prevista pelo modelo ETA, os valores de *EM* aumentam ligeiramente a superestimativa para uma e duas semanas, devido

ao acréscimo dos erros na previsão da chuva. Para três e quatro semanas os erros com chuva do modelo ETA passam a ser de subestimativa e se ampliam consideravelmente, devido à consideração de chuva nula a partir do décimo dia de previsão.

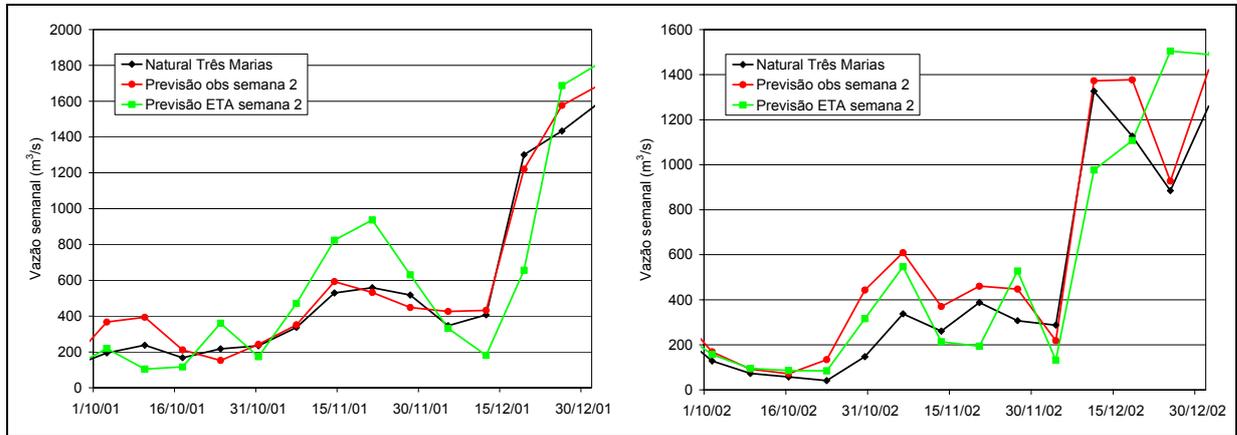


Figura 6.15: Previsões de vazão semanal com duas semanas de antecedência para Três Marias, com detalhe para o desempenho do modelo nas fortes subidas do hidrogramas nos meses de dezembro de 2001 e 2002.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{prev} - Q_{nat}|}{n} \quad (6.3)$$

$$EMR = \frac{\sum_{mes=1}^n \frac{|Q_{prev} - Q_{nat}|}{Q_{nat}}}{n} \quad (6.4)$$

$$RD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{nat} - Q_{prev})^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{nat} - Q_{nat}(t_0)]^2} \quad (6.5)$$

onde, n é o número de meses; Q_{prev} é a vazão prevista; Q_{nat} é a vazão natural e $Q_{nat}(t_0)$ é a última vazão natural antes da previsão.

Para os erros médio absolutos (Figura 6.16b), observa-se que há um crescimento linear com o aumento da antecedência. Neste caso deve-se considerar que a diferença entre EMA da vazão prevista com chuva do modelo ETA e o EMA da vazão baseada em chuva observada, corresponde à parcela do erro devido ao modelo ETA. Ou seja, para uma semana de

antecedência os valores de *EMA* se devem em maior parte ao modelo MGB, para duas e três semanas a maior parcela do *EMA* se deve à chuva utilizada (ETA e chuva nula após 10 dias) e para a quarta semana os erros devido ao modelo MGB são maiores devido, provavelmente, à perda da influência das condições iniciais.

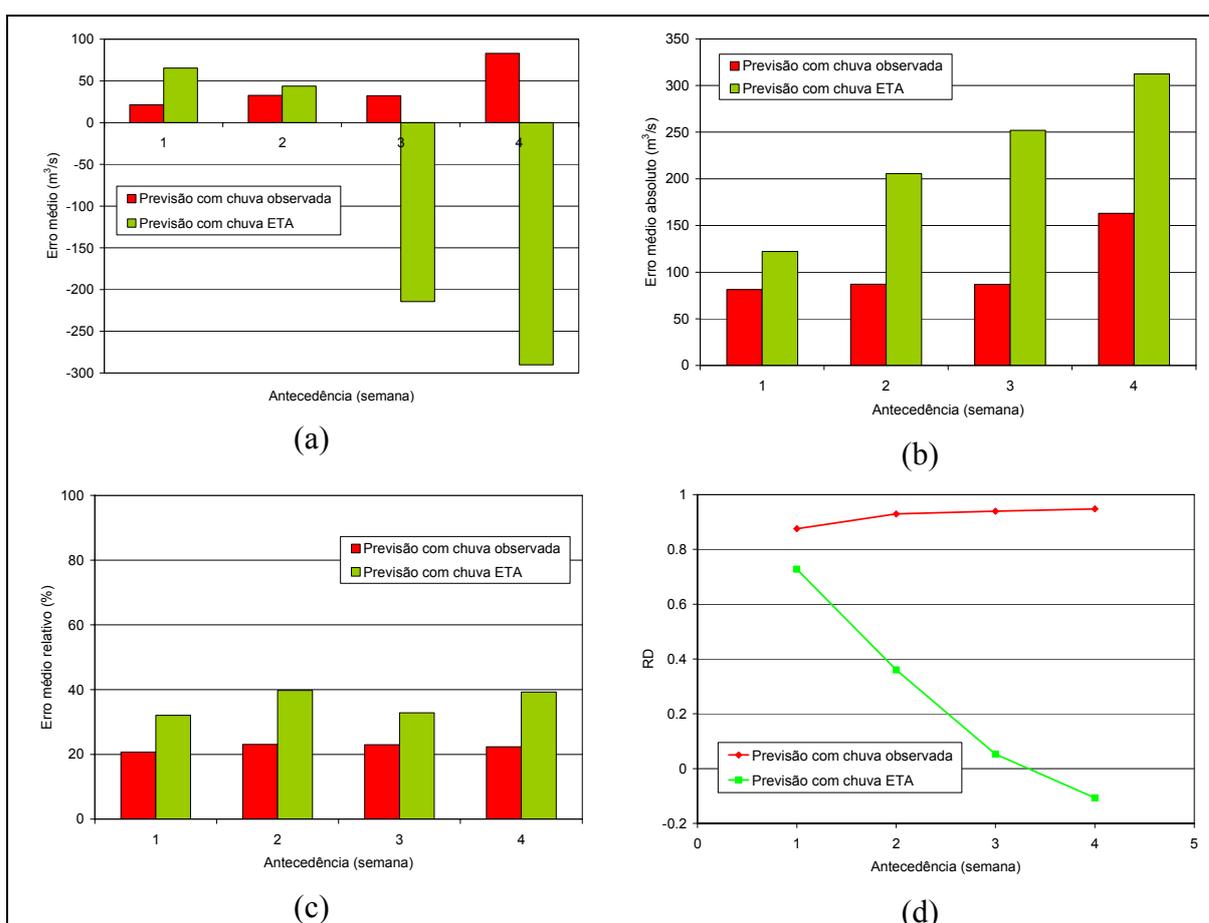


Figura 6.16: Médias dos erros absolutos das previsões de vazão semanal em Três Marias, nas antecedências de uma a quatro semanas: (a) erro médio (*EM*); (b) erro médio absoluto (*EMA*); (c) erro médio relativo (*EMR*); (d) coeficiente de persistência (*RD*).

Em termos de *EMR* (Figura 6.16c), nota-se que, na previsão com chuva observada os valores são de aproximadamente 20% para todas antecedências. Valores que são considerados elevados para as duas primeiras semanas de antecedência. Nota-se também que os valores de *EMR* sofrem uma redução de duas para três semanas de antecedência e voltam a aumentar em quatro semanas. Esse comportamento ocorre porque os erros relativos sofrem maior influência das vazões do período de estiagem. Erros nestes períodos são de pequena

magnitude, em unidades de vazão, quando comparados com as vazões do período úmido, mas são muito elevados em termos percentuais.

Portanto, os valores relativamente elevados de *EMR* para a previsão com chuva observada, na primeira e segunda semana, se devem a erros de ajuste do modelo MGB nas vazões de estiagem, ou a inconsistências nas vazões naturais, conforme discutido no Capítulo 6. Para as previsões com chuva do modelo ETA, deve-se considerar ainda que esse modelo, em algumas ocasiões, gerou eventos de chuva durante as estiagens que não ocorreram. Estes eventos, embora de pequena magnitude, são percentualmente grandes, elevando os valores de *EMR*. Para as antecedências de três e quatro semanas, a chuva prevista pelo ETA perde a influência sobre as vazões, reduzindo os erros na estiagem devidos a falsos eventos e, com isso, reduzindo os valores de *EMR*. Entretanto, os erros em termos absolutos (*EMA*) sempre aumentam, conforme a Figura 6.16b.

Deve-se considerar ainda que, os elevados erros da previsão de vazão baseada na chuva observada refletem que o modelo hidrológico pode ser aprimorado em termos de calibração e de metodologia de atualização. É possível, também, que existam erros consideráveis na representatividade da chuva observada na rede de postos pluviométricos existente.

Na Figura 6.16d são apresentados valores do coeficiente de persistência (*RD*), que compara as previsões com o modelo de mais simples, de considerar o valor futuro como sendo igual ao último valor observado. Nesta figura se observa que os valores de *RD* para previsão com chuva observada (linha vermelha) tendem a aumentar, com a ampliação da antecedência. Isto é natural porque a persistência do último valor observado tende a sempre aumentar os erros com o aumento da antecedência, e a previsão está considerando chuva prevista “perfeita”. Assim *RD* tende a aumentar, pois o modelo de previsão melhora relativamente ao último valor observado.

No caso da previsão com chuva do modelo ETA, o valor de *RD* é menor mesmo para uma semana de antecedência, e reduz rapidamente com a ampliação do horizonte de previsão. Nota-se que para três semanas *RD* é próximo de zero, indicando que praticamente não existe benefício na previsão. Para quatro semanas *RD* é menor do zero, significando que a previsão com os modelo ETA/MGB é inferior ao modelo de simples persistência. Portanto, o coeficiente de persistência (*RD*), indica que a previsão e vazões naturais para Três Marias, com chuva prevista pelo modelo ETA, possui ganhos somente para antecedência de até 2 semanas.

Na Figura 6.17 são apresentados os gráficos de correlação entre as vazões naturais e previstas com o modelo ETA/MGB, para as antecedências de uma e duas semanas. Os gráficos mostram que, para uma semana a dispersão dos pontos de previsão em torno da previsão perfeita (linha tracejada) é pequena, mas percebe-se que existe uma leve tendência de superestimativa (pontos acima da linha tracejada) até cerca de 2500 m³/s, conforme já mostrado pelos valores de *EM* (Figura 6.16a). Para duas semanas de antecedência, a dispersão dos pontos aumenta para vazões acima de 500 m³/s, principalmente, mas não mostram claramente a superestimativa detectada na Figura 6.16a.

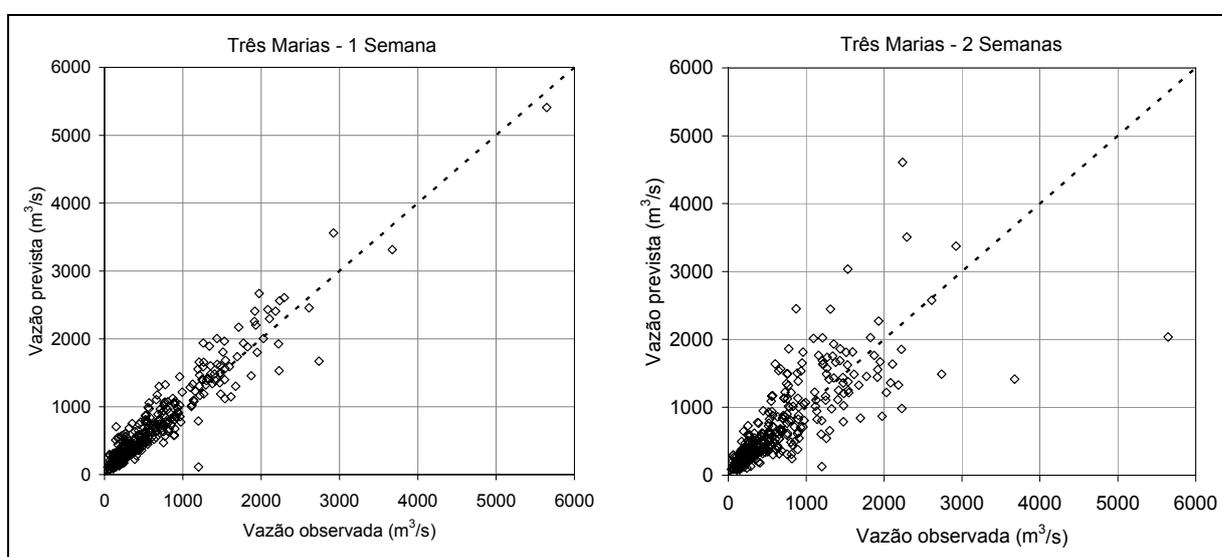


Figura 6.17: Correlação entre vazão observada e prevista com base nas previsões do modelo ETA para Três Marias, nas antecedências de uma e duas semanas.

6.3.2 Resultados de previsão de vazão de curto prazo em Sobradinho

Assim como nos testes de previsão de curto prazo para Três Marias, a metodologia de previsão de vazão de curto prazo para Sobradinho foi baseada no uso do modelo hidrológico, utilizando dados de chuva observada e prevista, de forma semelhante como seria possível realizar operacionalmente, desde que houvesse transmissão dos dados de chuva em tempo real, ou a cada dia.

Para avaliar a qualidade das previsões do modelo ETA/MGB em comparação com o desempenho histórico dos modelos usados pelo ONS (PREVIVAZ e CPINS), as previsões

diárias foram transformadas em vazões médias semanais. A Figura 6.18 apresenta as vazões previstas pelos modelos com uma semana de antecedência nos anos de 1996 a 2003.

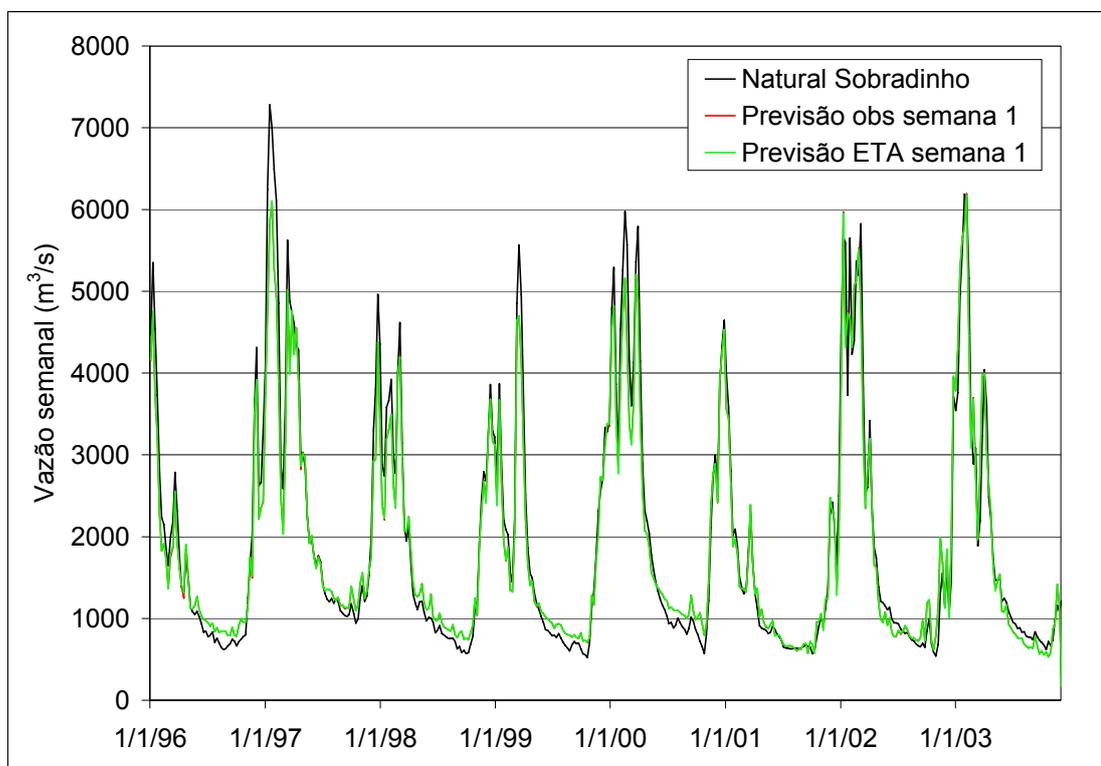


Figura 6.18: Previsões de vazão semanal com uma semana de antecedência para Sobradinho (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha vermelha: previsão de vazão baseada na chuva observada).

Assim como em Três Marias, para facilitar a análise o gráfico da Figura 6.18 foi dividido em três períodos, destacados na Figura 6.19. Nestas figuras, nota-se que a linha vermelha, que indica a previsão baseada na chuva observada, está encoberta pela linha verde. Isto ocorre porque no horizonte de uma semana, a vazão afluente a Sobradinho depende, basicamente, do volume de água que já se encontra na calha do rio principal, que é dado de entrada do modelo CPINS através das vazões dos diferentes postos fluviométricos do trecho. As previsões de chuva do ETA têm muito pouca influência para a antecedência de uma semana em Sobradinho.

Observa-se na Figura 6.19 que as previsões baseadas nas previsões de chuva do modelo ETA acompanham bem as variações do hidrograma observado. Nas vazões máximas, nota-se que os picos dos últimos três períodos úmidos (2000/2001 a 2002/2003) são muito bem previstos. Entretanto, nos verões de 1996/1997 a 1999/2000 os principais picos de vazão são subestimados. Em relação aos períodos de estiagem, observa-se na Figura 6.19 que o

modelo ETA/MGB apresenta tendência de superestimativa até outubro de 2000. No ano de 2001 as vazões de estiagem são bem representadas, em 2002 existem semanas de sub e superestimativa, e em 2003 o modelo subestima todo o período seco.

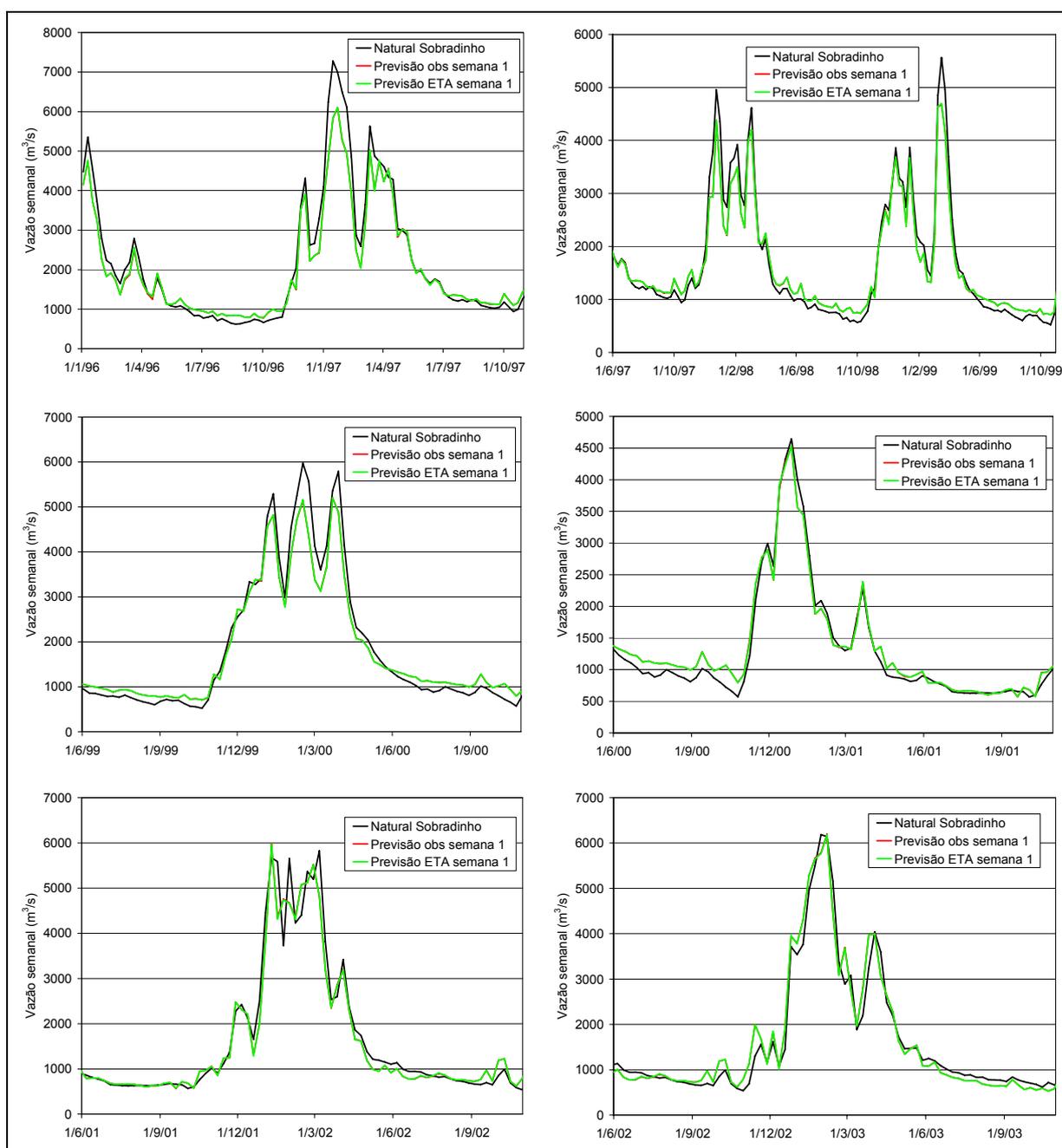


Figura 6.19: Previsões de vazão semanal com 1 semana de antecedência para Sobradinho no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003 (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha vermelha: previsão de vazão baseada na chuva observada).

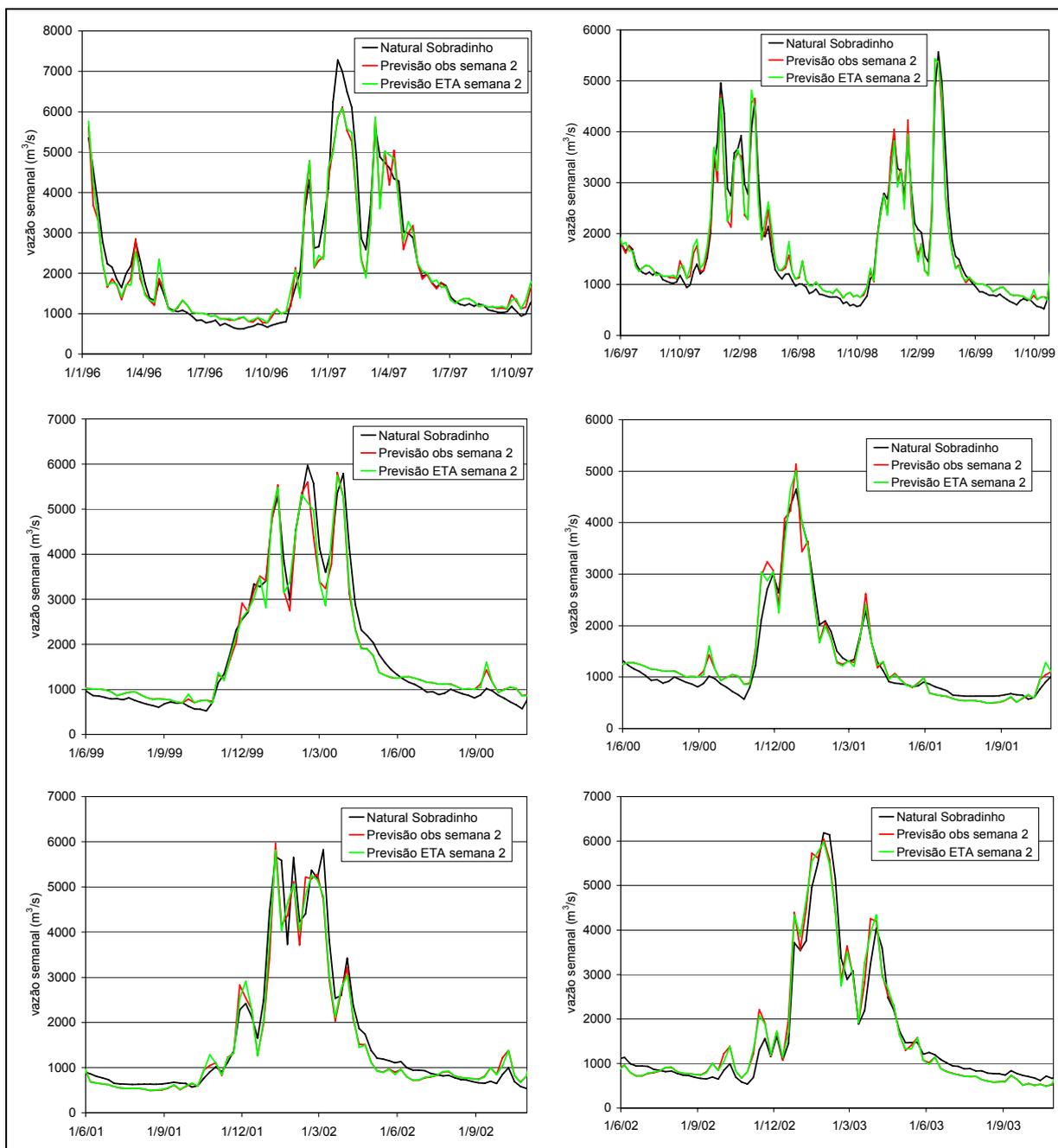


Figura 6.20: Previsões de vazão semanal com duas semanas de antecedência para Sobradinho no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003 (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha vermelha: previsão de vazão baseada na chuva observada).

Para antecedência de duas semanas a qualidade das previsões em Sobradinho praticamente não se altera, em uma análise visual, devido a longa memória da bacia até Sobradinho. A Figura 6.20 apresenta as vazões previstas pelos modelos com duas semanas de antecedência nos anos de 1996 a 2003.

Assim como para Três Marias, a qualidade das previsões foi avaliada utilizando-se, além da análise gráfica, as seguintes estatísticas: o erro médio (EM), o erro médio absoluto (EMA), o erro médio relativo (EMR) e o coeficiente de persistência (RD). As estatísticas das previsões de vazão para as antecedências de uma a quatro semanas em Sobradinho são apresentados na Figura 6.21.

Observa-se na Figura 6.21a que as previsões em Sobradinho usando chuva observada (colunas vermelhas) mostram uma tendência de subestimativa das vazões para as antecedências de uma e duas semanas, e de superestimativa para os horizontes de três e quatro semanas. Nota-se que estes valores de EM são bastante reduzidos, em comparação com as vazões totais observadas em Sobradinho. Utilizando a chuva prevista pelo modelo ETA, os valores de EM se mantêm igualmente baixos até a antecedências de três semanas, sendo até menor para 2 semanas. Mas, para quatro semanas de antecedência os erros com chuva do modelo ETA passam a apresentar forte subestimativa, devido à consideração de chuva nula a partir do décimo dia de previsão.

Para os erros médios absolutos (Figura 6.21b), observa-se que as previsões com chuva prevista pelo modelo ETA apresentam valores praticamente idênticos a previsão com chuva observada, nas antecedências de uma e duas semanas. Isto se deve, provavelmente, à longa memória da bacia contribuinte à usina de Sobradinho. Para três semanas os valores de EMA se ampliam de forma significativa, mas somente para quatro semanas é que os erros devido à chuva (ETA e nula após 10 dias) se tornam maiores do que a parcela de erros devido ao modelo hidrológico MGB.

Em termos de EMR (Figura 6.21c), nota-se que os valores também são bastante reduzidos para todas as antecedências e crescem linearmente. Em Sobradinho não ocorrem os problemas observados em Três Marias, provavelmente porque a bacia contribuinte é consideravelmente maior e a influência de pequenos eventos de chuva durante a estiagem não é tão importante no cálculo do EMR , como em Três Marias.

Novamente, deve-se considerar ainda que erros da previsão de vazão baseada na chuva observada refletem que o modelo hidrológico pode ser aprimorado em termos de calibração e de metodologia de atualização. É possível, também, que existam erros consideráveis na representatividade da chuva observada na rede de postos pluviométricos existente.

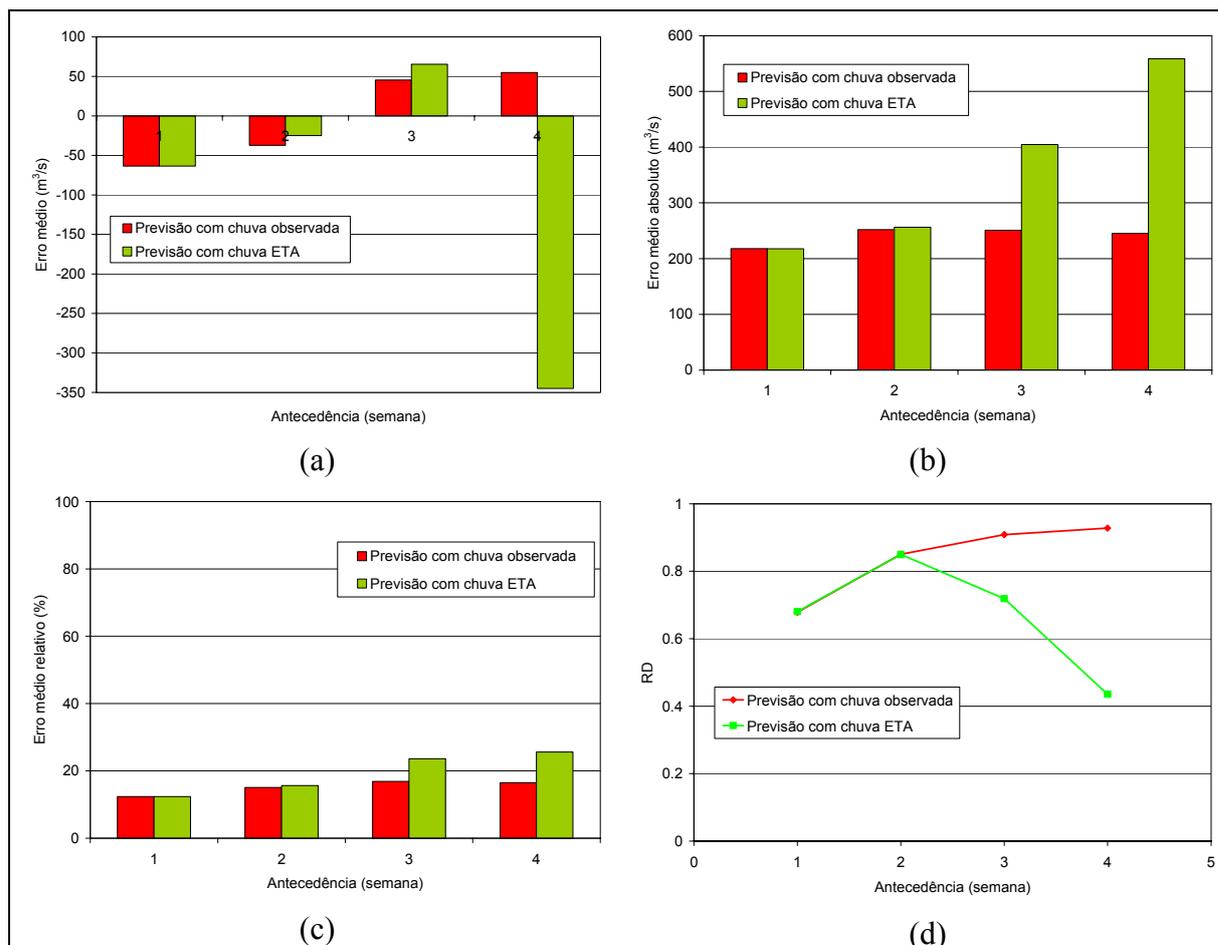


Figura 6.21: Médias dos erros absolutos das previsões de vazão semanal em Sobradinho, nas antecedências de uma a quatro semanas: (a) erro médio (EM); (b) erro médio absoluto (EMA); (c) erro médio relativo (EMR); (d) coeficiente de persistência (RD).

Na Figura 6.21d se observa que os valores de RD para previsão com chuva observada (linha vermelha) tendem a aumentar, com a ampliação da antecedência. Isto é natural porque a persistência do último valor observado tende a sempre aumentar os erros com o aumento da antecedência, e a previsão está considerando chuva prevista “perfeita”. No caso da previsão com chuva do modelo ETA, o valor de RD é praticamente idêntico para as duas primeiras semanas de antecedência. Para três semanas a previsão do modelo ETA/MGB reduz o valor, mas ainda é maior do que para uma semana, e mesmo para quatro semanas as previsões em Sobradinho apresentam benefícios importantes quando em comparação com a persistência do último valor observado.

Na Figura 6.22 são apresentados os gráficos de correlação entre as vazões naturais observadas em Sobradinho e as previstas com o modelo ETA/MGB, para as antecedências de uma e duas semanas. Os gráficos mostram que, para uma semana a dispersão dos pontos de

previsão em torno da previsão perfeita (linha tracejada) é pequena, mas percebe-se que existe uma tendência de subestimativa (pontos abaixo da linha tracejada) para valores acima de 2000 m^3/s , conforme já mostrado pelos valores de EM (Figura 6.21a). Para duas semanas de antecedência, a dispersão dos pontos tem um leve aumento e também se percebe uma pequena tendência de subestimativa, semelhante ao gráfico de uma semana.

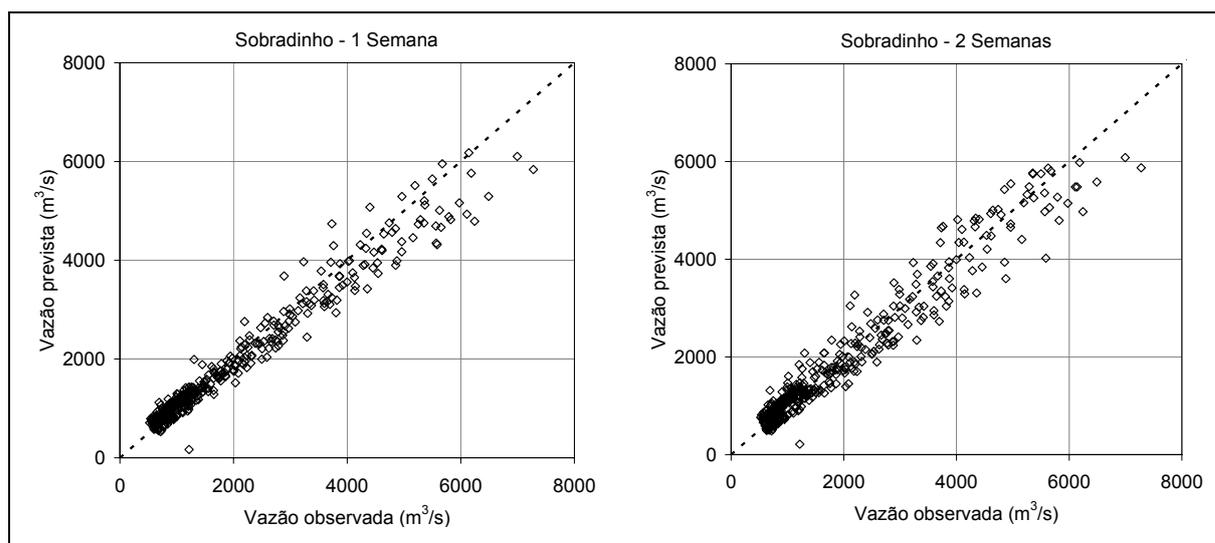


Figura 6.22: Correlação entre vazão natural e prevista com base nas previsões do modelo ETA para Sobradinho, nas antecedências de uma e duas semanas.

6.4 Modelo de Previsão dos Resíduos

Neste item são analisados os resíduos das previsões de vazão do modelo MGB, com chuva prevista pelo modelo ETA. O objetivo destas análises é identificar possíveis estruturas de autocorrelação nas séries de resíduos, que permitam utilizar modelos autoregressivos para estimar os erros futuros e, por consequência, reduzir as incertezas das previsões de vazão.

6.4.1 Previsão dos resíduos em Três Marias

Na Figura 6.23 são apresentados as séries de resíduos da previsões de vazão em Três Marias no período de 1996 a 2003, para as antecedências de uma e duas semanas, e na Tabela

6.2 os respectivos valores de média e desvio padrão. Nota-se que, embora o erro médio das previsões com antecedência de duas semanas seja menor do que no caso de uma semana (-65,48 e -43,66 m³/s, respectivamente), a variância nas previsões de duas semanas é significativamente maior, conforme se observam nos gráficos e pelos valores de desvio padrão. Para uma semana, o comportamento da série praticamente não se altera ao longo do tempo. Para duas semanas, ocorrem alguns valores de maior amplitude nos primeiros anos, mas pode-se admitir que o comportamento da série não apresenta grandes mudanças durante o período. Também se nota que a variância dos erros é maior durante as semanas do período úmido (outubro a março), mas esse é um comportamento que pode ser considerado normal em um sistema de previsão.

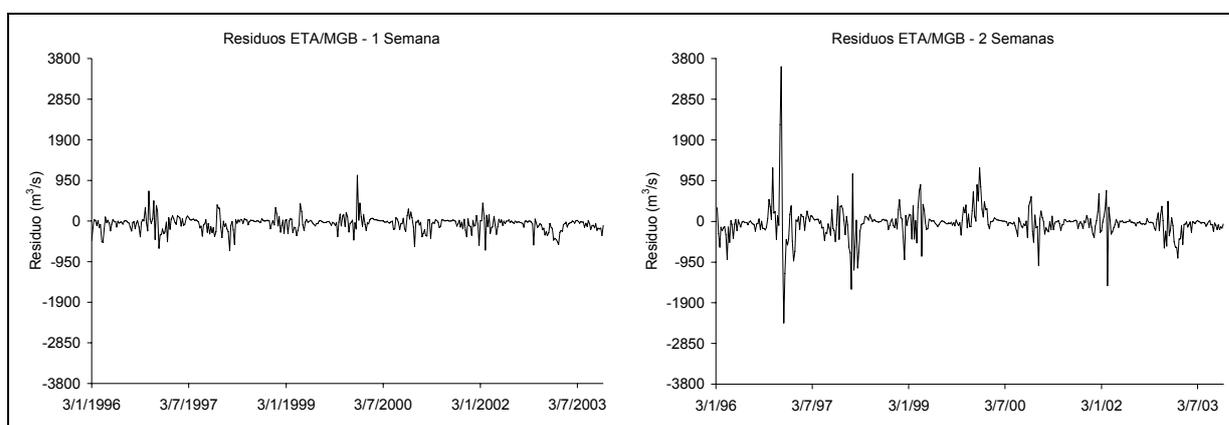


Figura 6.23: Resíduos das previsões de vazão do modelo MGB com chuva prevista pelo ETA em Três Marias, para antecedências de uma e duas semanas.

Tabela 6.2: Estatísticas dos resíduos da previsão de vazões em Três Marias

Antecedência	Média (m ³ /s)	Desvio Padrão (m ³ /s)
1 semana	-65,48	177,31
2 semanas	-43,66	389,57

Para a escolha de um modelo de previsão desses resíduos, foram considerados inicialmente os três primeiros anos das séries, ou seja, as primeiras 156 semanas. Na Figura 6.24 são apresentados os correlogramas dos resíduos de uma e duas semanas de antecedência, obtidos com as 156 primeiras semanas. Nestes gráficos, as linhas tracejadas representam os limites de 95% de probabilidade de independência. Pode-se observar que, para uma semana

existe autocorrelação estatisticamente significativa para *lag* igual a um, embora com valor muito baixo. Para duas semanas de antecedência, também existe uma correlação significativa para o *lag* um, mas que não possui utilidade prática, uma vez que a previsão operacional para duas semanas só é possível utilizando o *lag* dois ou maior.

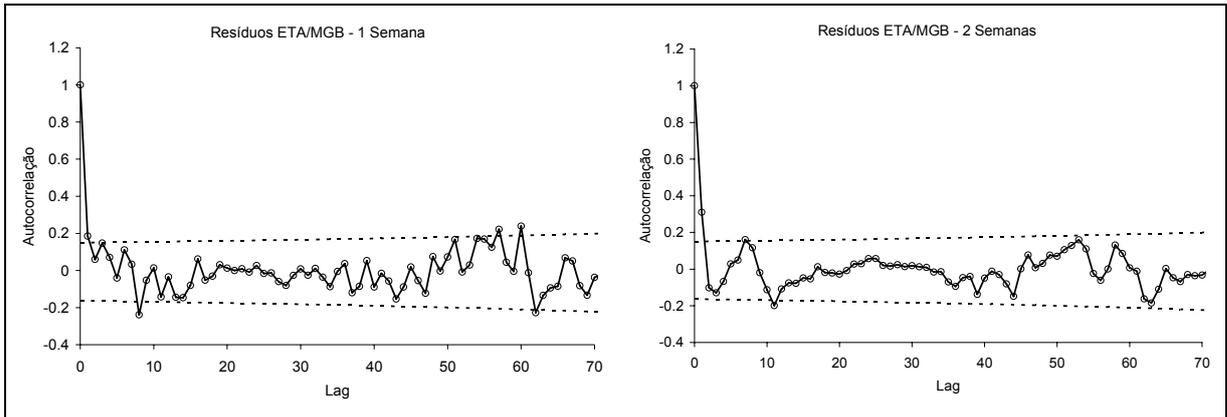


Figura 6.24: Correlogramas dos resíduos das previsões de vazão em Três Marias para as primeiras 156 semanas e antecedências de uma e duas semanas.

Conforme descrito no Capítulo 5, foram testados modelos do tipo autoregressivos e função de transferência. Devido à baixa autocorrelação detectada nas séries dos resíduos, foram testados termos autoregressivos somente com *lag* um, resultando nos seguintes modelos para uma semana de antecedência:

$$E(t) = a_1.E(t-1) + \xi(t) \quad (6.6)$$

$$E(t) = a_1.E(t-1) + b_1.P_{ETA}(t) + \xi(t) \quad (6.7)$$

$$E(t) = a_1.E(t-1) + b_1.WCI(t-1) + \xi(t) \quad (6.8)$$

$$E(t) = a_1.E(t-1) + b_1.P_{ETA} + b_2.WCI(t-1) + \xi(t) \quad (6.9)$$

Onde: E é o resíduo da previsão de vazão; P_{ETA} é a precipitação prevista pelo modelo ETA para os sete primeiros dias; WCI é a umidade média na camada de solo do modelo MGB no início da previsão; ξ é um termo totalmente aleatório; a_1 , b_1 e b_2 são parâmetros a serem ajustados.

Dessa forma, a vazão prevista pelo modelo MGB, com chuva do prevista pelo ETA, é corrigida por:

$$Q_{corr}(t) = Q_{prev}(t) + E(t) \quad (6.10)$$

Onde: Q_{corr} é a vazão prevista corrigida; Q_{prev} é a vazão prevista pelos modelos ETA/MGB; E é o resíduo previsto.

Os parâmetros dos modelos dos resíduos (Equações 6.6 a 6.9) foram determinados através da minimização do somatório dos quadrados dos erros, utilizando o algoritmo de otimização SCE-UA (Duan et al., 1994), baseado na técnica de algoritmos genéticos. Esse procedimento foi realizado utilizando as semanas de 1 a 156, para uma primeira estimativa. Para as semanas de 1 a 156 foi utilizado sempre o mesmo conjunto de parâmetros (otimizado com base nestas mesmas 156 semanas). Para escolha do melhor modelo de previsão dos resíduos, foram avaliados os resultados em termos de erros médios entre a vazão natural (Q_{nat}) e a vazão prevista corrigida (Q_{corr}), além da análise gráfica dos hidrogramas.

Os resultados para as previsões de uma semana são apresentados na Tabela 6.3. Nesta tabela se observa que a previsão com o modelo ETA/MGB apresentou um erro médio absoluto (EMA) de 128,6 m³/s e erro médio relativo (EMR) de 26,2%. Aplicando a previsão dos resíduos através das Equações 6.6 a 6.9, todos os modelos mostraram redução nos valores dos erros médios (Tabela 6.3). Entretanto, o melhor desempenho foi obtido com o modelo função de transferência da Equação 6.7, que usa um termo autoregressivo de ordem 1 e a chuva prevista pelo modelo ETA. Com esse modelo os valores de EMA e EMR se reduziram para os valores 108,5 m³/s e 19,9%, respectivamente.

Para as previsões com duas semanas de antecedência, foram usadas as Equações 6.6 a 6.9, porém com os termos do lado direito $E(t-1)$ e $WCI(t-1)$ alterados para $E(t-2)$ e $WCI(t-2)$, uma vez que a previsão operacional dos resíduos de duas semanas é possível somente com o *lag* 2. Além disso, o termo P_{ETA} corresponde ao total de chuva prevista pelo modelo ETA nos 10 dias do horizonte de previsão. Os resultados do ajuste para as primeiras 156 semanas são apresentados na Tabela 6.4. Novamente, o modelo da Equação 6.7 resultou em melhor ajuste, pois reduziu os valores de EMA e EMR de 277,6 m³/s e 42,5%, obtidos com os modelos ETA/MGB, para 256,3 m³/s e 35,3%.

Tabela 6.3: Resultados do ajuste dos modelos de previsão dos resíduos em Três Marias, para uma semana de antecedência.

Modelo	EMA das Vazões (m³/s)	EMR das Vazões (%)
6.6	122,1	24,1
6.7	108,5	19,9
6.8	124,6	25,0
6.9	109,5	20,2
ETA/MGB	128,6	26,2

Tabela 6.4: Resultados do ajuste dos modelos de previsão dos resíduos em Três Marias, para duas semanas de antecedência. Obs.: os termos do lado direito $E(t-1)$ e $WCI(t-1)$ das equações dos modelos são alterados para $E(t-2)$ e $WCI(t-2)$.

Modelo	EMA das Vazões (m³/s)	EMR das Vazões (%)
6.6	284,4	44,4
6.7	256,3	35,3
6.8	284,6	43,3
6.9	258,4	35,6
ETA/MGB	277,6	42,5

Após a definição do modelo com melhor resultado para as duas antecedências, foram feitas previsões dos resíduos para as demais semanas, ou seja, da semana 157 até a 413. Para isso, foram testadas duas formas de atualização dos parâmetros, em relação a quantidade de dados usados para ajuste do modelo. Na primeira, a partir da semana 156 os parâmetros foram sendo atualizados para cada nova previsão, mas utilizando-se sempre uma janela móvel de 156 semanas. Isto significa que, para a previsão da semana 157 os parâmetros foram otimizados considerando os erros das semanas 1 a 156, para a semana 158 foram usadas os dados das semanas 2 a 157, e assim por diante.

No segundo critério, a janela de dados é sempre crescente, ou seja, o limite inferior é sempre a primeira semana da série, resultando que, na previsão da semana 413, por exemplo,

foram usados os dados da semana 1 a 412 para atualização dos parâmetros. Os resultados dos de ambos os critérios, medidos em termos de erros médios das vazões naturais previstas corrigidas, são apresentados na Tabela 6.5. Nota-se que os resultados são praticamente idênticos, mostrando que, para o período analisado, a janela constante de 156 semanas (3 anos) se mostrou suficientemente representativa para um ajuste adequado do modelo de previsão dos resíduos.

Tabela 6.5: Erros médios das previsões de vazão corrigidas em Três Marias, para o período total de 413 semanas e os critérios de atualização dos parâmetros com janela constante de 156 semanas e janela crescente.

Antecedência	Janela Constante		Janela Crescente	
	<i>EMA (m³/s)</i>	<i>EMR (%)</i>	<i>EMA (m³/s)</i>	<i>EMR (%)</i>
1 semana	98,4	23,0	100,2	23,8
2 semanas	195,0	34,0	191,7	33,4

Assim, os resultados das correções com a janela móvel de atualização dos parâmetros serão utilizados em comparação com as previsões originalmente geradas pelos modelos ETA/MGB. Na Figura 6.25 são apresentados os resultados das correções para 1 semana de antecedência. Nota-se que as correções obtidas com a previsão dos resíduos são relativamente pequenas e as maiores mudanças ocorrem a partir do final do ano de 2000.

Para duas semanas de antecedências os resultados são semelhantes, porém as correções tiveram menor intensidade, por isso não serão apresentados os hidrogramas. Para avaliar os benefícios da correção das previsões através da estimativa dos resíduos, a Figura 6.26 apresenta os resultados em termos de erros médios absolutos e relativos. Verifica-se nessa figura que as maiores reduções de erros ocorrem para 1 semana de antecedência, conforme já mencionado. Em termos relativos (Figura 6.26b) os erros das previsões corrigidas ficaram muito próximas das previsões com chuva observada, para 1 semana. Os parâmetros atualizados dos modelos dos resíduos são apresentados no ANEXO C.

Embora a redução nos erros para duas semanas tenha sido bastante pequena, considerando todo o período de análise, destaca-se que a correção pode trazer benefícios importantes quando o comportamento dos erros se altera e passa a apresentar um caráter

sistemático. Isso pode acontecer por variados motivos, como mudanças climáticas e/ou de uso do solo, extinção de postos pluviométricos ou problemas nas medições, ou cálculo, das vazões.

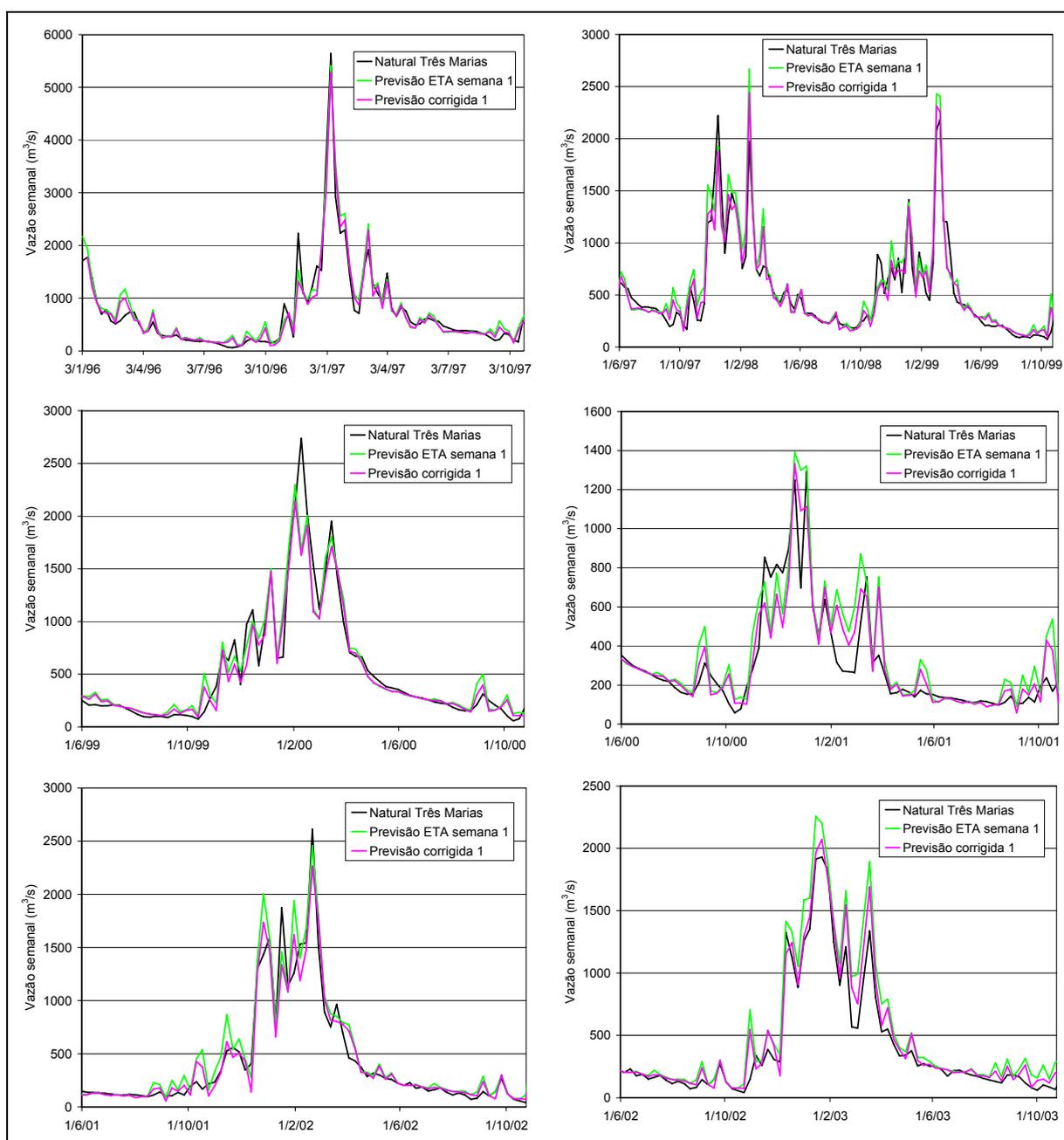


Figura 6.25: Previsões de vazão semanal com 1 semana de antecedência para Três Marias no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003 (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha magenta: previsão de vazão corrigidas pelo modelo de previsão dos resíduos).

No caso de Três Marias, esse tipo de comportamento é observado a partir do final do ano de 2002, conforme já mencionado. Por isso, durante o período úmido de 2002/2003 e a estiagem de 2003 é que o benefício da previsão dos resíduos é mais perceptível, porque neste período as previsões dos modelos ETA/MGB passam a apresentar uma superestimativa sistemática das vazões.

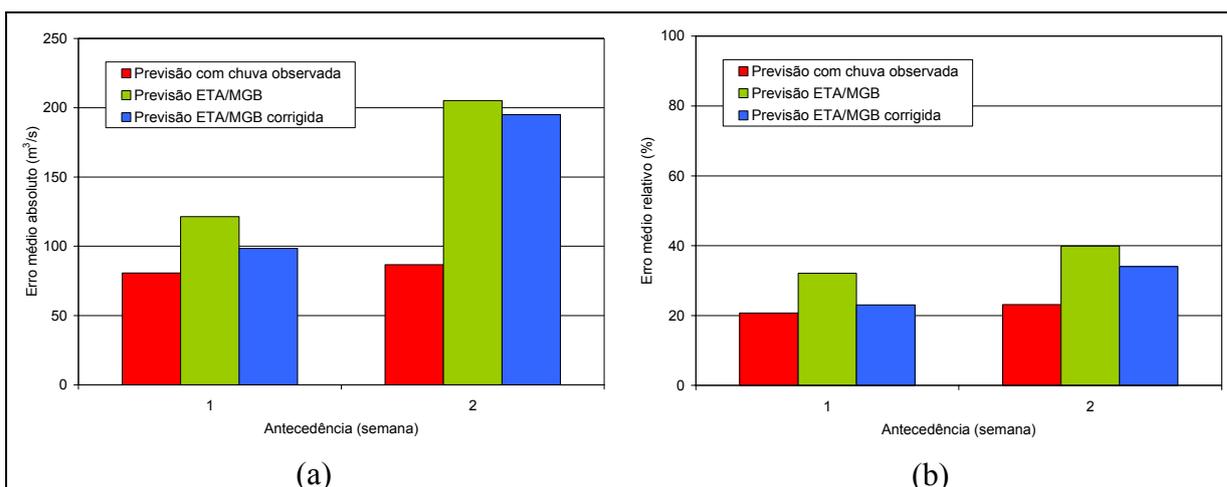


Figura 6.26: Erros médios absolutos (a) e relativos (b) das previsões em Três Marias, no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003. Previsões usando chuva observada (vermelho), chuva prevista pelo ETA (verde) e previsões corrigidas com o modelo dos resíduos (azul).

A Figura 6.26 apresenta os erros médios calculados para o período mencionado, ou seja, de outubro de 2002 a dezembro de 2003. Nessa figura se observa que a proporção de redução dos erros é maior do que no período completo (1996 a 2003), sendo que, com exceção dos erros absolutos para 2 semanas, todos os demais erros das vazões corrigidas passam a serem menores do que a previsão com chuva observada. Esse comportamento demonstra que a maior parcela dos erros, no período 2002/2003, se deve ao modelo hidrológico ou às inconsistências nas vazões naturais. Contudo, independentemente da causa dessa superestimativa, os resultados da Figura 6.26 demonstram que a utilização do modelo de previsão dos resíduos pode ter relevante importância na previsão de vazões em Três Marias.

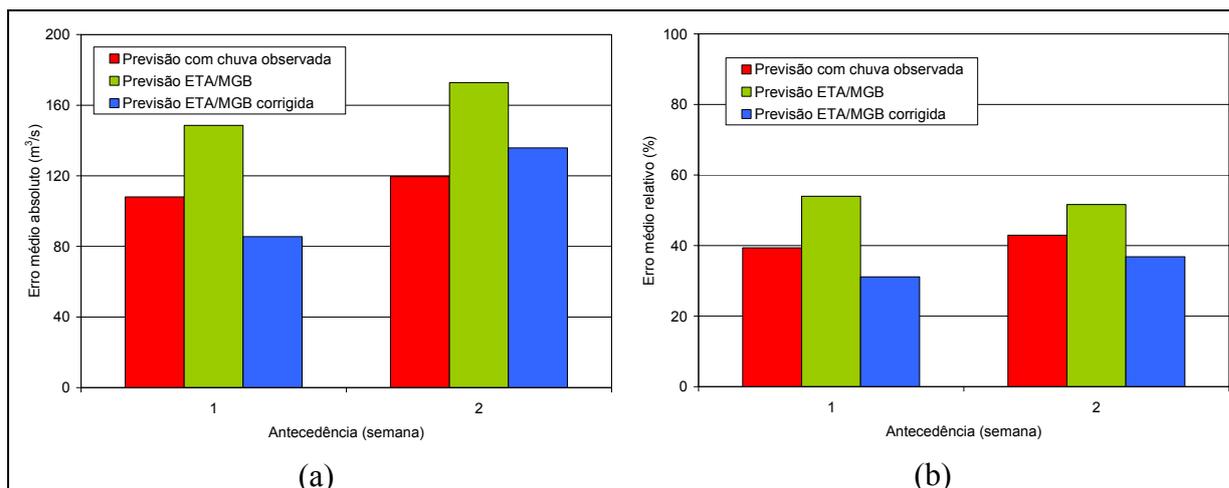


Figura 6.27: Erros médios absolutos (a) e relativos (b) das previsões em Três Marias, no período de outubro de 2002 a dezembro de 2003. Previsões usando chuva observada (vermelho), com chuva prevista pelo ETA (verde) e previsões corrigidas com o modelo dos resíduos (azul).

6.4.2 Previsão dos resíduos em Sobradinho

Na Figura 6.23 são apresentados as séries de resíduos das previsões de vazão em Sobradinho no período de 1996 a 2003, para as antecedências de 1 e 2 semanas. Em ambos os gráficos dessa figura se observa que as séries apresentam dois períodos de comportamento bastante distintos, pois até o final do ano de 2000 os erros possuem um comportamento sazonal bem definido, com valores positivos e de grande amplitude durante os verões e valores negativos e de menor amplitude durante as estiagens. A partir de 2001 o comportamento das séries muda e, embora a amplitude dos erros se mantenha, a sazonalidade praticamente desaparece. Na Tabela 6.6 são apresentados os valores de média e desvio padrão das séries. Para as antecedências de 3 e 4 semanas os gráficos não são apresentados, mas as características são semelhantes. Entretanto, adianta-se que os resultados da previsão de 3 e 4 semanas não foram satisfatórios e, portanto, não são apresentados.

Devido a essas características dos resíduos em Sobradinho, decidiu-se realizar o ajuste de modelos diferentes para os dois períodos identificados. Para os anos de 1996 a 2000, assim como em Três Marias, inicialmente foram considerados os três primeiros anos das séries, ou seja, as primeiras 156 semanas. Nesse caso, antes de realizar o ajuste, retirou-se a sazonalidade das séries subtraindo-se a média (calculada sobre os 3 anos) de cada uma das 52 semanas do ano.

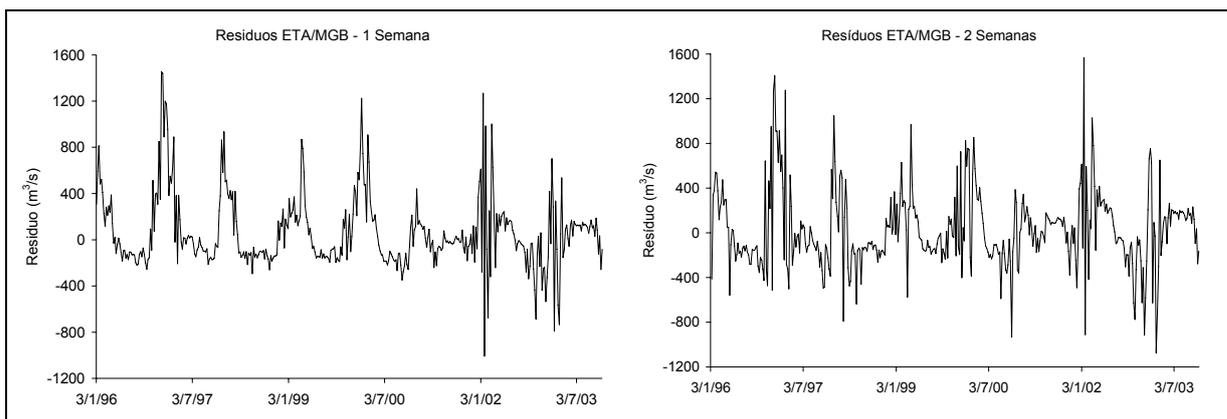


Figura 6.28: Resíduos das previsões de vazão do modelo MGB com chuva prevista pelo ETA em Sobradinho, para antecedências de uma e duas semanas.

Tabela 6.6: Estatísticas dos resíduos da previsão de vazões em Sobradinho

Antecedência	Média (m ³ /s)	Desvio Padrão (m ³ /s)
1 semana	63,61	315,51
2 semanas	24,86	350,27

Retirada a sazonalidade, na Figura 6.29a,b são apresentados os correlogramas dos resíduos de 1 e 2 semanas de antecedência, obtidos com as 156 primeiras semanas do período 1996 a 2000. Pode-se observar que, para 1 semana existe autocorrelação estatisticamente significativa para *lags* até 12, embora com valores muito baixos. Para duas semanas de antecedência, praticamente não se observa correlação significativa para os *lags* 1 e 2, mas mesmo assim é realizado o ajuste de um modelo, uma vez que em períodos subsequentes poderão aparecer autocorrelações significativas, como ocorrido em Três Marias.

Para os anos de 2001 a 2003 o ajuste inicial dos modelos foi realizado utilizando-se apenas 52 semanas (1 ano), uma vez que todo esse período possui o total de 153 semanas. Assim, na Figura 6.29c,d são apresentados os correlogramas dos resíduos de 1 e 2 semanas, para as primeiras 52 semanas. Para 1 semana existe autocorrelação significativa para *lags* 1 e 2, mas para 2 semanas de antecedência a autocorrelação é menor e somente para *lag* igual a 1, que infelizmente não possui utilidade prática para essa antecedência.

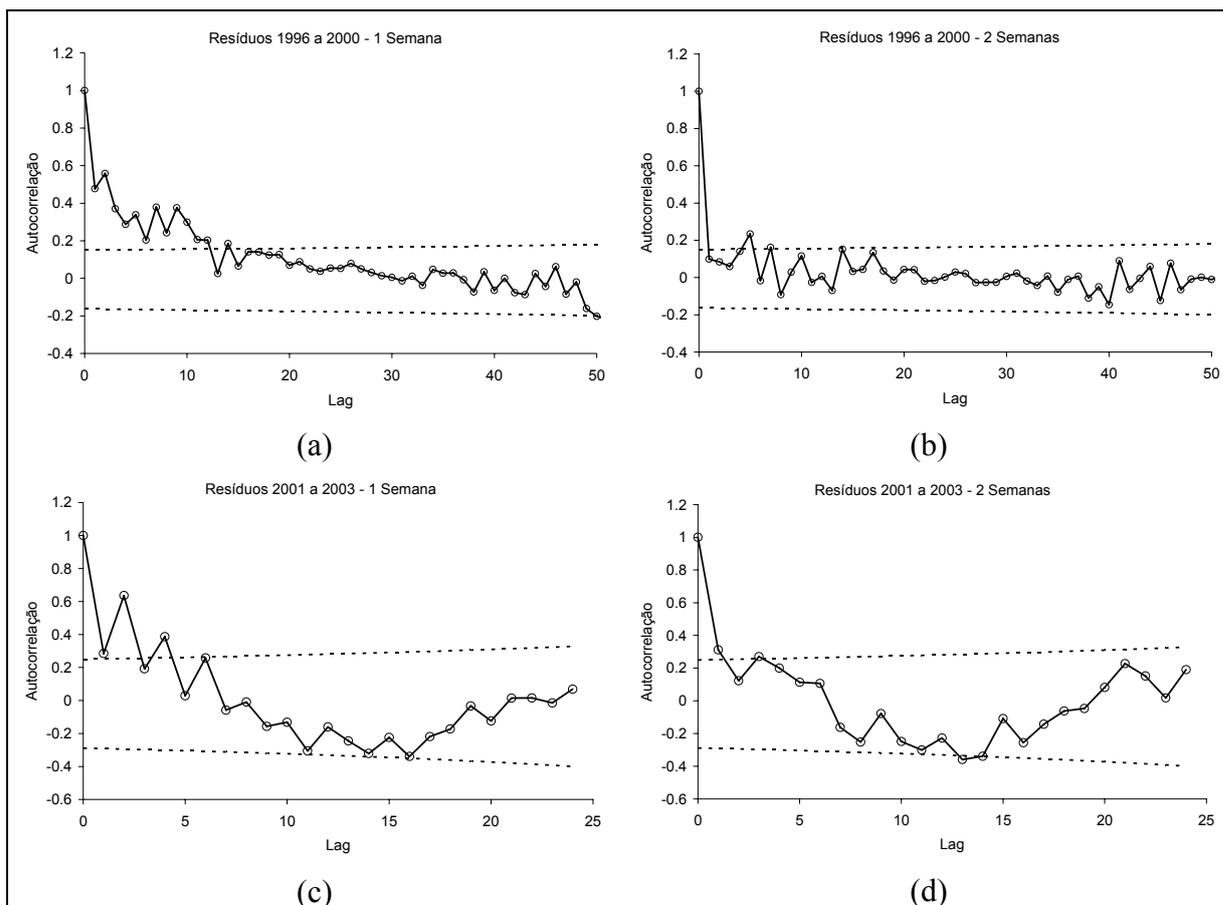


Figura 6.29: Correlogramas dos resíduos das previsões de vazão a Sobradinho nas antecedências de 1 e 2 semanas: (a,b) primeiras 156 semanas do período 1996 a 2000; (c,d) primeiras 52 semanas do período 2001 a 2003.

Devido a característica dos correlogramas dos resíduos de 1 semana (Figura 6.29a,c), que apresentam autocorrelações relativamente altas, foi acrescentado mais um termo autoregressivos aos modelos, resultando nas seguintes equações testadas para 1 semana de antecedência:

$$E(t) = a1.E(t-1) + a2.E(t-2) + \xi(t) \quad (6.10)$$

$$E(t) = a1.E(t-1) + a2.E(t-2) + b1.P_{ETA}(t) + \xi(t) \quad (6.11)$$

$$E(t) = a1.E(t-1) + a2.E(t-2) + b1.WCI(t-1) + \xi(t) \quad (6.12)$$

$$E(t) = a1.E(t-1) + a2.E(t-2) + b1.P_{ETA} + b2.WCI(t-1) + \xi(t) \quad (6.13)$$

Onde: E é o resíduo da previsão de vazão; P_{ETA} é a precipitação prevista pelo modelo ETA para os sete primeiros dias; WCI é a umidade média na camada de solo do modelo MGB no

início da previsão; ξ é um termo totalmente aleatório; a_1 , b_1 e b_2 são parâmetros a serem ajustados.

Para escolha do melhor modelo de previsão dos resíduos, foram avaliados os resultados em termos de erros médios entre a vazão natural (Q_{nat}) e a vazão prevista corrigida (Q_{corr}), além da análise gráfica dos hidrogramas.

Os resultados para as previsões de 1 semana são apresentados na Tabela 6.7. Nesta tabela se observa que a previsão com o modelo ETA/MGB apresentou um erro médio absoluto (EMA) de 239,25 m³/s e erro médio relativo (EMR) de 12,61%. Aplicando a previsão dos resíduos através das Equações 6.10 a 6.13, todos os modelos mostraram redução nos valores dos erros médios (Tabela 6.7), destacando-se o período de 1996 a 2000, onde os valores foram para menos de 50% dos originais. Esses resultados mostram que, nos dois períodos, os modelos das Equações 6.10 a 6.13 apresentam maior redução dos erros médios do que a Equação 6.10. Porém, o ganho marginal desses modelos é muito reduzido, não justificando o seu uso. Assim, escolheu-se o modelo da Equação 6.10 para previsão dos resíduos em ambos os períodos.

Tabela 6.7: Resultados do ajuste dos modelos de previsão dos resíduos em Sobradinho, para uma semana de antecedência.

Modelo	1996 a 2000		2001 a 2003	
	EMA (m ³ /s)	EMR (%)	EMA (m ³ /s)	EMR (%)
6.10	94,45	4,77	67,05	6,40
6.11	93,97	4,73	66,50	6,31
6.12	94,43	4,77	66,39	6,26
6.13	94,03	4,73	66,31	6,25
ETA/MGB	239,25	12,61	86,93	7,10

Para as previsões com duas semanas de antecedência, foram usadas as Equações 6.6 a 6.9, aplicadas em Três Marias, porém com os termos do lado direito $E(t-1)$ e $WCI(t-1)$ são alterados para $E(t-2)$ e $WCI(t-2)$, uma vez que a previsão operacional dos resíduos de duas semanas é possível somente com o lag 2. Os resultados do ajuste para as primeiras 156

semanas do período 1996 a 2000, e as 52 semanas dos anos 2001 a 2003 são apresentados na Tabela 6.8.

Para o primeiro período de anos, a tabela mostra que o modelo da Equação 6.6 é o que apresenta o melhor resultado, pois o ganho marginal dos outros modelos é desprezível. Neste caso, os valores de EMA e EMR foram reduzidos de 283,26 m³/s e 16,21%, obtidos com os modelos ETA/MGB, para 174,66 m³/s e 8,77%.

Nos anos de 2001 a 2003, os resultados da Tabela 6.8 indicam que os melhores modelos são representados pelas Equações 6.8 e 6.9. Entretanto, o modelo 6.9 foi descartado porque o benefício marginal em se adicionar mais uma variável, aumentando um parâmetro, é pequeno. Em relação a Equação 6.8, os testes posteriores de previsão para o restante do período, não mostraram benefícios em relação a Equação 6.6. Dessa forma, optou-se por escolher a Equação 6.6 como o melhor modelo para o período posterior a 2000.

Tabela 6.8: Resultados do ajuste dos modelos de previsão dos resíduos em Sobradinho, para duas semanas de antecedência. Obs.: os termos do lado direito $E(t-1)$ e $WCI(t-1)$ das equações dos modelos são alterados para $E(t-2)$ e $WCI(t-2)$.

Modelo	1996 a 2000		2001 a 2003	
	EMA (m ³ /s)	EMR (%)	EMA (m ³ /s)	EMR (%)
6.6	174,66	8,77	123,75	11,49
6.7	174,61	8,78	126,28	11,73
6.8	174,84	8,84	116,08	10,61
6.9	174,54	8,91	113,65	10,09
ETA/MGB	283,26	16,21	126,65	11,94

Após a definição do modelo com melhor resultado para as duas antecedências, foram feitas previsões dos resíduos para as demais semanas. No primeiro período (1996 a 2000), os parâmetros do modelo de resíduo foram sendo atualizados para cada nova previsão, a partir da semana 156, mas utilizando-se sempre uma janela móvel de 156 semanas. No segundo período das séries (2001 a 2003), foi utilizada uma janela de dados sempre crescente, ou seja,

o limite inferior é sempre a primeira semana da série. A Figura 6.30 apresenta o resultado das correções nas previsões com 1 semana de antecedência.

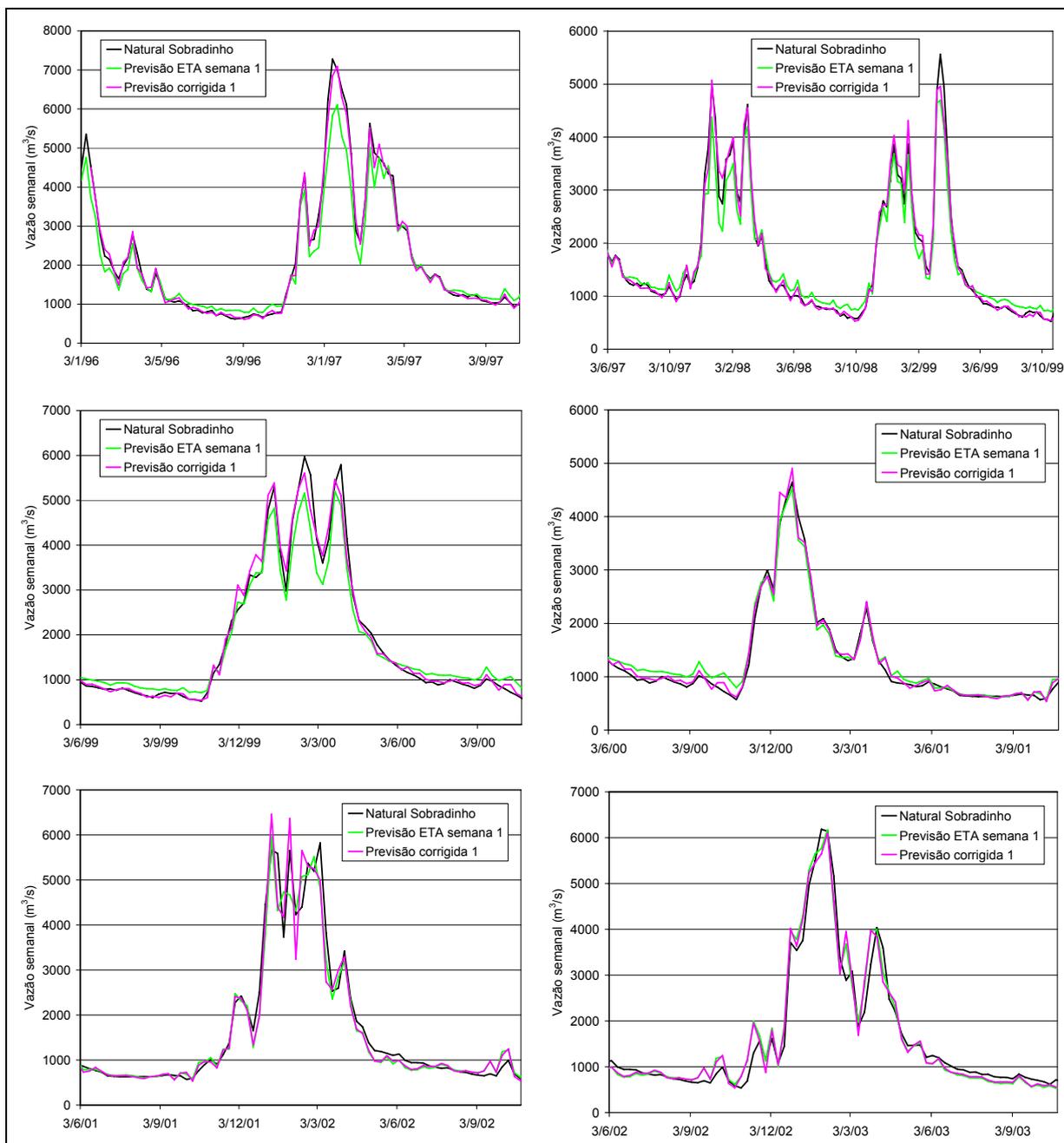


Figura 6.30: Previsões de vazão semanal com 1 semana de antecedência para Sobradinho no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003 (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha magenta: previsão de vazão corrigidas pelo modelo de previsão dos resíduos).

Os gráficos mostram que os melhores resultados são obtidos até o final do ano 2000, conforme já indicado pela Tabela 6.7. Nesse período, se observa que as correções são muito boas tanto nas estiagens como nos meses úmidos. A partir de 2001 os erros do modelo ETA/MGB são menores e também com fraco comportamento sistemático, resultando em um efeito reduzido das correções. Para as previsões com 2 semanas de antecedência os resultados são bastante semelhantes, conforme se observa na Figura 6.31. Os parâmetros atualizados dos modelos são apresentados no ANEXO D.

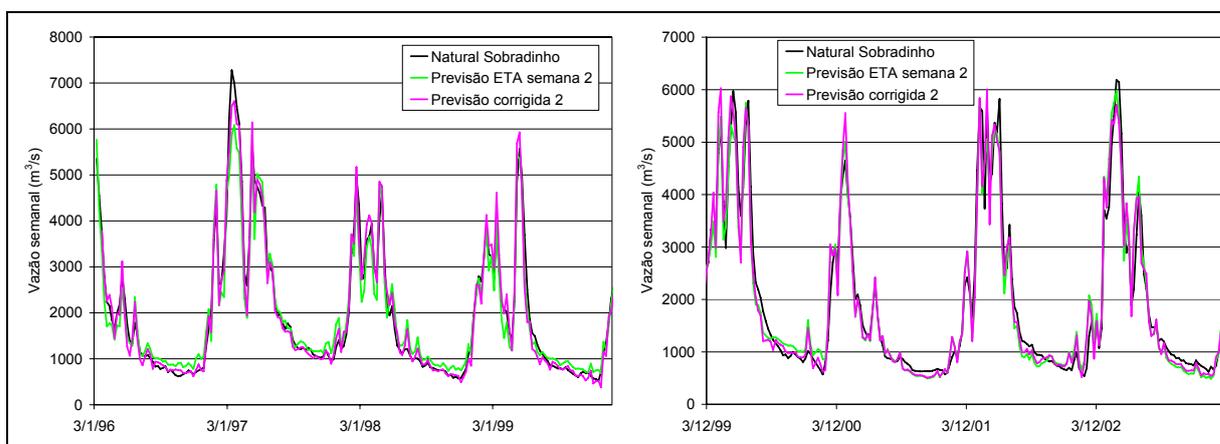


Figura 6.31: Previsões de vazão semanal com 2 semanas de antecedência para Sobradinho no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003 (linha preta: vazão natural; linha verde: previsões baseadas na previsão de chuva do modelo ETA; linha magenta: previsão de vazão corrigidas pelo modelo de previsão dos resíduos).

De acordo com a descrição do Capítulo 6, durante o ajuste do modelo hidrológico MGB-IPH foram detectadas grandes inconsistências nas vazões observadas dos trechos entre Bom Jesus da Lapa e Morpará e entre Morpará e Sobradinho. A solução adotada para a simulação destes trechos foi considerar a existência de perdas não explicadas e introduziram-se retiradas constantes de $250 \text{ m}^3/\text{s}$ em ambos os trechos. Todas as previsões para Sobradinho apresentadas anteriormente foram realizadas mantendo-se essas retiradas.

Por esse motivo realizou-se um teste adicional nas previsões de Sobradinho, gerando-se previsões dos modelos ETA/MGB sem as retiradas de $250 \text{ m}^3/\text{s}$ e ajustaram-se modelos de previsão dos resíduos sobre essas séries, para correção das previsões. O comportamento dos resíduos dessas previsões é muito semelhante àqueles das previsões com retiradas, permitindo que fossem ajustados modelos autoregressivos com a mesma estrutura.

Os resultados das correções são apresentados na Figura 6.32 e Figura 6.33, para 1 e 2 semanas de antecedências, respectivamente. Nessas figuras se observa que a diferença entre a vazão natural e a prevista pelos modelos ETA/MGB é muito grande, mas as correções dos modelos de resíduos são bastante eficientes, em consequência do caráter sistemático e sazonal dos erros.

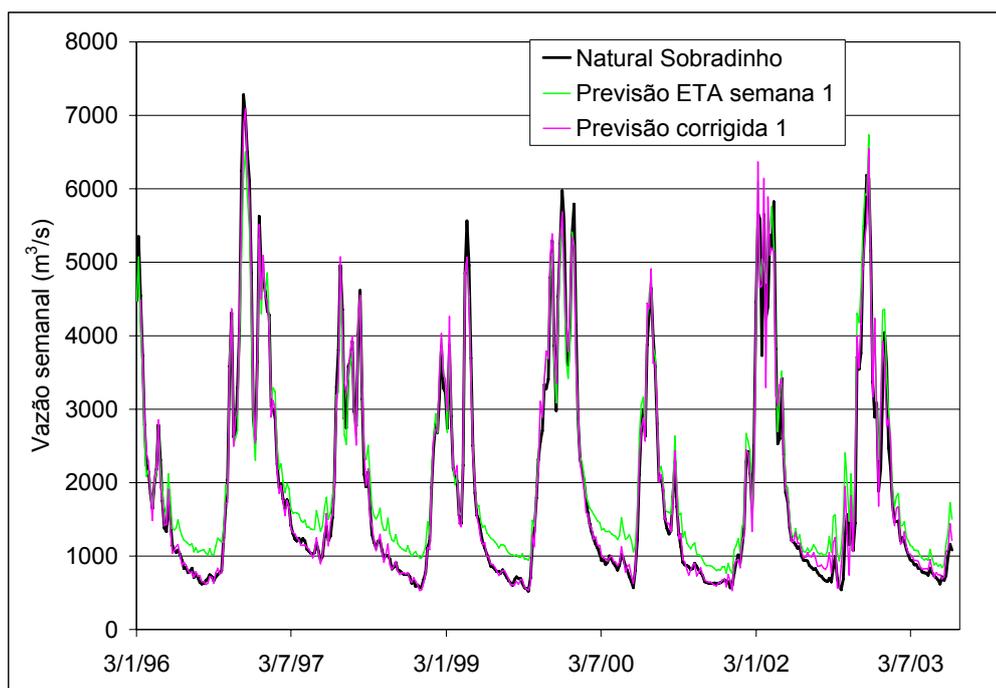


Figura 6.32: Previsões de vazão semanal com 1 semana de antecedência para Sobradinho no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003: a linha verde indica as previsões dos modelos ETA/MGB sem as retiradas constantes de $250\text{m}^3/\text{s}$ em Morpará e Sobradinho; a linha magenta é essa previsão corrigida pelo modelo dos resíduos.

Em termos de erros médios, os resultados são apresentados na Figura 6.34, juntamente com os correspondentes valores das previsões corrigidas feitas com as retiradas constantes no modelo MGB. Nota-se que o resultado, embora ligeiramente inferior, pode ser considerado igual nas duas abordagens. Apesar disso, a solução das retiradas no modelo MGB se mostram mais adequadas, porque permitem realizar previsões com boa precisão para antecedências de até 28 dias e com diferentes intervalos (vazões médias diárias, semanais ou quinzenais), com saídas diretas do modelo hidrológico. Sem as retiradas não explicadas, é necessário ajustar um modelo de resíduos para cada situação, tornando o processo mais complexo e gerando o mesmo resultado.

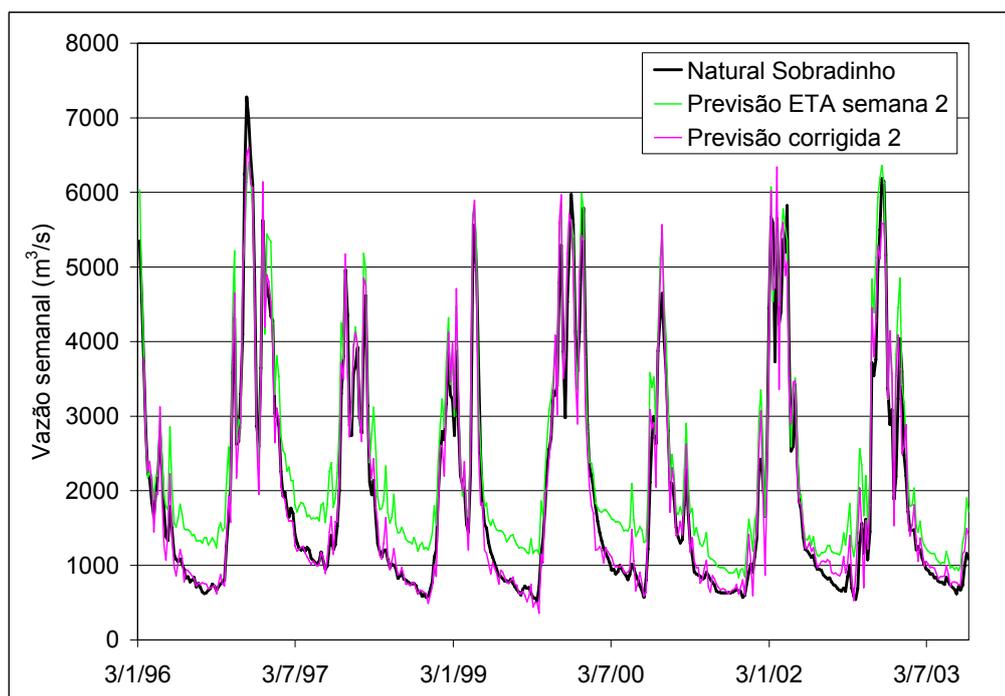


Figura 6.33: Previsões de vazão semanal com 2 semanas de antecedência para Sobradinho no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003: a linha verde indica as previsões dos modelos ETA/MGB sem as retiradas constantes de $250\text{m}^3/\text{s}$ em Morpará e Sobradinho; a linha magenta é essa previsão corrigida pelo modelo dos resíduos.

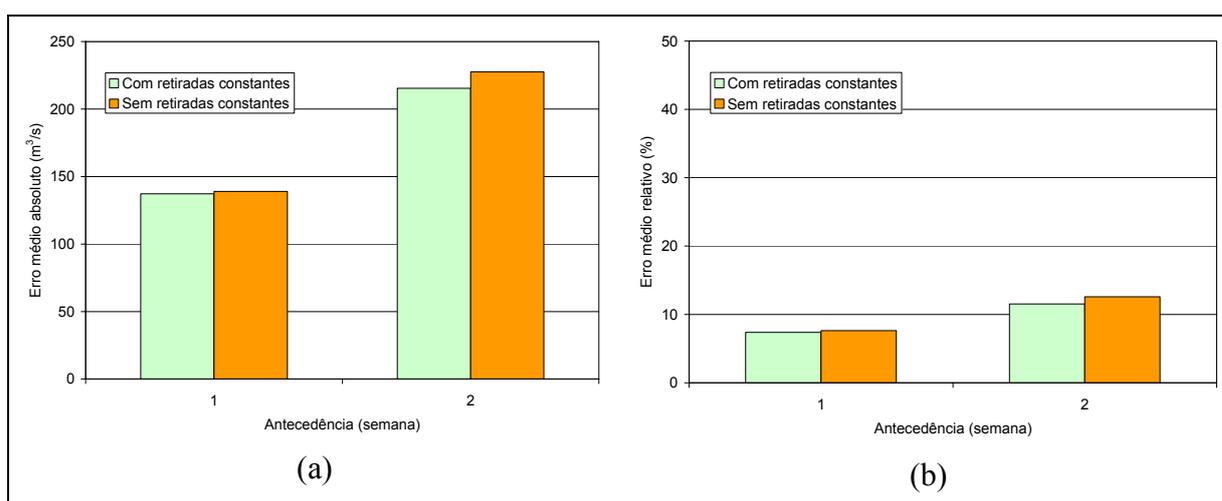


Figura 6.34: Erros médios absolutos (a) e relativos (b) das previsões de vazão corrigidas em Sobradinho: em verde são previsões realizadas com retiradas constantes de $250\text{ m}^3/\text{s}$ no modelo MGB e em laranja são previsões sem as retiradas.

Na Figura 6.35 são apresentados os erros médios das vazões corrigidas (resultados obtidos com as retiradas de 250 m³/s no modelo MGB), para 1 e 2 semanas de antecedência. Os gráficos mostram que a redução nos erros foi maior, proporcionalmente, do que em Três Marias, tanto para uma como para duas semanas. Também se observa que as diferenças são muito pequenas entre as previsões com chuva observada e com chuva do ETA, devido à grande memória da bacia. Com isso os erros da previsão se devem quase que totalmente ao modelo hidrológico, para até duas semanas de antecedência. Dessa forma, os erros médios com as correções dos resíduos são menores do que com a chuva observada, pois são corrigidas as deficiências no ajuste do modelo hidrológico e/ou inconsistência nas séries de vazões observadas e naturais.

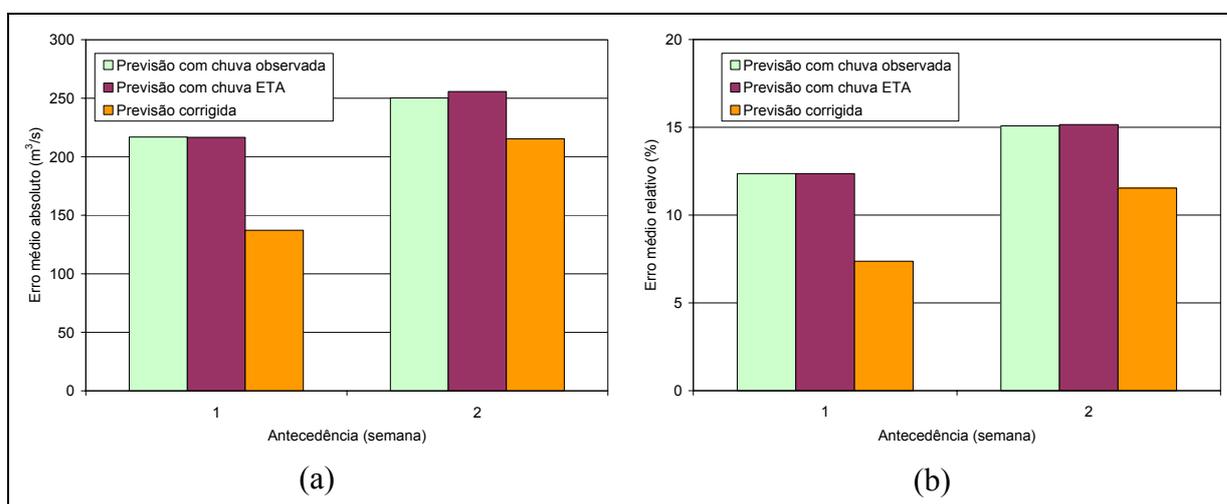


Figura 6.35: Erros médios absolutos (a) e relativos (b) das previsões em Sobradinho, no período de outubro de 2002 a dezembro de 2003. Previsões usando chuva observada (verde), com chuva prevista pelo ETA (vermelho) e previsões corrigidas com o modelo dos resíduos (laranja).

Deve-se salientar que as correções foram mais eficientes no período de 1996 a 2000, onde os erros eram claramente sistemáticos e sazonais. A partir de 2001 esse comportamento se alterou e o efeito da previsão dos resíduos foi bem menor. Apesar disso, entende-se que o modelo de resíduos deve continuar sendo utilizado, pois o modelo de previsão de vazões pode, por motivos já citados, voltar a apresentar as características similares às observadas antes de 2001.

6.5 Resumo do Capítulo

As previsões de curto prazo foram feitas com base em previsões de precipitação do modelo ETA, com intervalo de tempo diário até o horizonte de 10 dias. Utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH, as previsões de vazão foram avaliadas para antecedências de 28 dias em Três Marias e Sobradinho. A partir do décimo dia de previsão, quando se encerra a chuva prevista, considerou-se precipitação igual a zero. As vazões foram avaliadas em valores médios semanais, conforme os critérios usados pelo ONS, ou seja, as previsões têm início sempre toda quarta-feira. As previsões foram feitas para o período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003.

Para a usina de Três Marias os resultados indicaram que o modelo baseado nas previsões do ETA apresentou bons resultados para as antecedências de uma e duas semanas. Em horizontes maiores, de três e quatro semanas, os resultados pioram bastante, pois extrapolam demasiadamente a memória da bacia.

Na usina de Sobradinho, os resultados são melhores do que em Três Marias, devido à grande memória da bacia contribuinte. Para antecedências até duas semanas a influência da precipitação prevista é pequena nas vazões, e somente a partir da terceira semana são notados erros elevados, causados pelas limitações no conhecimento da precipitação.

Portanto, as previsões hidroclimáticas de curto prazo são bastante promissoras para a bacia do rio São Francisco, particularmente no horizonte de até duas semanas em Três Marias e até 4 semanas em Sobradinho. Além do bom desempenho no período estudado, destaca-se que o modelo foi capaz de antecipar fortes crescimentos nas vazões. Essa característica é de grande importância para a geração de energia e controle de cheias e, no entanto, os modelos estocásticos têm dificuldade em prever.

Foram testados modelos de previsão dos resíduos das previsões em Três Marias e Sobradinho. O modelo que apresentou melhores resultados em Três Marias foi o do tipo função de transferência, que inclui um termo autoregressivo dos resíduos e a precipitação prevista pelo ETA como variável explicativa. O mesmo tipo de modelo foi ajustado para uma e duas semanas de antecedência. Para atualização dos modelos foi usada uma janela móvel constante de 156 semanas e os melhores resultados são notados a partir de 2002, quando os erros passam a se comportar de forma sistemática.

Em Sobradinho também foram ajustados modelos de resíduos para uma e duas semanas. Devido a mudança de comportamento dos erros a partir do ano 2001, foram ajustados modelos diferentes para os períodos antes e a partir desse ano. Entre 1996 e 2000 os erros são bastante sistemáticos e com sazonalidade bem definida, mas a partir de 2001 a sazonalidade desaparece. Para uma semana de antecedência os modelos ajustados foram autoregressivos de ordem dois, nos dois períodos, e mostraram excelentes resultados. Para duas semanas os modelos foram autoregressivos de ordem um, também com resultados muito bons nos dois períodos entre 1996 e 2003.

7 PREVISÕES CLIMÁTICAS DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

7.1 Previsões Climáticas do Modelo Global CPTEC/INPE

Conforme descrito no Capítulo 4, foram obtidas as previsões do AGCM do CPTEC entre outubro de 1997 e abril de 2003, com anomalias de TSM persistidas e com 5 condições iniciais, com intervalo de 24 horas entre elas. Para realizar as previsões, a partir da data das condições iniciais, o modelo AGCM do CPTEC corre em modo de simulação por cerca de dois meses e meio utilizando TSM observada. A partir de então, durante o período de previsão, foi utilizado o dado de anomalia de TSM do último mês de simulação somado ao campo médio climatológico de TSM do mês de previsão em questão. Cada integração do AGCM realizada neste estudo tem cerca de 2,5 meses de simulação e 6 meses de previsão. Todavia, ao invés de serem pós-processadas somente as médias mensais dos resultados do modelo, como é feito habitualmente no esquema operacional do CPTEC, foram pós-processados resultados a cada 6 horas, a partir da data da condição inicial, durante oito meses e meio a partir da data da condição inicial.

Os objetivos de disponibilizar resultados a cada 6 horas são para um melhor monitoramento da variação diurna do escoamento, temperatura e precipitação na bacia do São Francisco e para fornecer resultados com variação diurna para o modelo regional ETA. Os resultados da previsão por conjuntos (5 membros) são disponibilizados em forma digital em 15 níveis de pressão atmosférica: 1000, 925, 850, 775, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, e 30 hPa e num total de 25 variáveis previstas, entre elas: componentes zonal e meridional do vento, pressão reduzida ao nível médio do mar, temperatura da superfície, umidade relativa próxima à superfície, umidade do solo na superfície, precipitação total, entre outras.

Os dados do modelo global foram disponibilizados em uma grade de pontos distanciados de 1,875 grau em longitude e 1,865 grau em latitude, correspondendo a células de aproximadamente 200 por 200km. A resolução do modelo global sobre a bacia do rio São Francisco é mostrada na Figura 7.1, onde os pontos vermelhos representam o centro de cada célula, que estão delimitadas pelas linhas de grade.

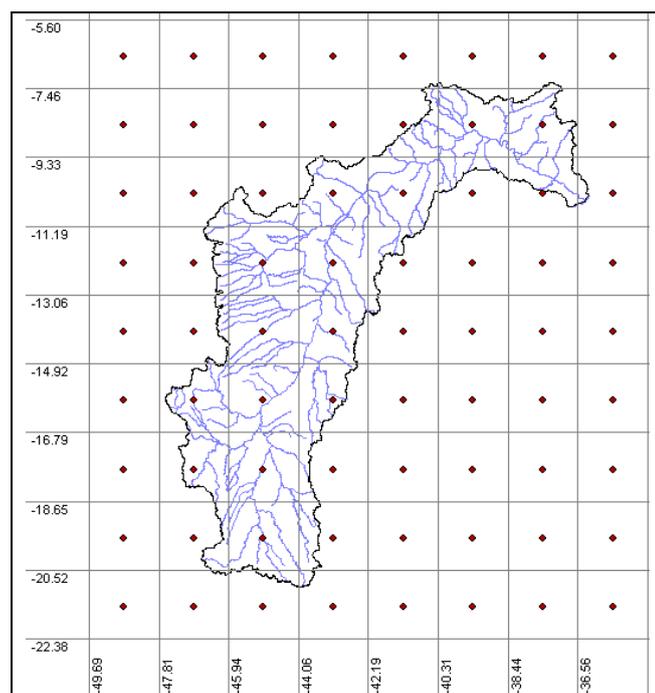


Figura 7.1: Resolução espacial do modelo global do CPTEC e o contorno da bacia do rio São Francisco.

7.1.1 Correção dos erros sistemáticos na precipitação prevista

Para utilização da chuva prevista como entrada no modelo hidrológico, os erros sistemáticos, mostrados anteriormente, devem ser eliminados ou minimizados. A metodologia de correção dos erros sistemáticos mais empregada em previsões climáticas de precipitação, está baseada numa transformação da curva de distribuição de probabilidades de precipitação (Hay e Clark, 2003; Tucci et al., 2003; Hay et al. 2002; e Wood et al., 2002). Neste método, para cada mês do ano e para cada ponto da grade de previsão do modelo climático são desenvolvidas duas curvas de distribuição de probabilidade, ou seja, para os dados observados e para os valores previstos. Uma das vantagens deste método é permitir a manutenção da variabilidade interanual, que foi razoavelmente bem captada pelo modelo.

Neste trabalho, optou-se por realizar as correções com base nos valores mensais, utilizando como referência um conjunto de simulações do modelo global para o período de jan/1950 a dez/2001. Estas simulações são denominadas por climatologia do modelo, uma vez que as precipitações são geradas somente a partir de dados observados, ou seja, não são previsões. Na Figura 7.2 são apresentadas as precipitações totais mensais da climatologia do modelo, para dois pontos de grade: o primeiro está localizado próximo na região do baixo São Francisco, com célula de centro nas coordenadas 37,5°W e 10,26°S; o segundo se localiza no alto São Francisco, nas coordenadas 45,0°W e 19,59°S. Nessas figuras estão apresentadas as precipitações simuladas pelo modelo global do CPTEC, compostas por um conjunto de 10 (dez) simulações e a média das mesmas, além dos valores observados na rede de estações locais, para o período de jan/1970 a dez/1996.

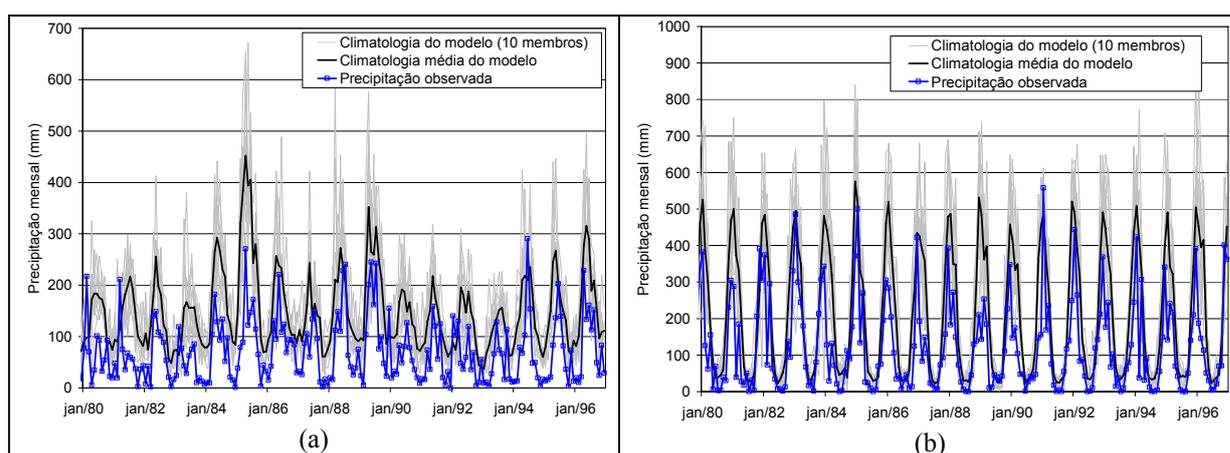


Figura 7.2: Erros sistemáticos na precipitação acumulada mensal simulada pelo modelo global do CPTEC, para a célula centrada nas coordenadas 37,5°W e 10,26°S.

Na Figura 7.2a, nota-se que o modelo capta bem a variabilidade interanual (anos secos e úmidos), mas superestima sistematicamente os valores de precipitação. Já na porção sul da bacia, Figura 7.2b, observa-se que os erros sistemáticos são de menor magnitude, representando muito bem o ciclo anual, mas não mostra uma boa representação da variabilidade interanual, ou seja, o modelo tem dificuldade em representar anos secos e úmidos, gerando períodos úmidos sempre muito semelhantes.

Para realizar as correções das chuvas previstas, foram construídas curvas empíricas de distribuição de probabilidades com a climatologia do modelo, média das 10 simulações, e os respectivos valores observados. Embora a climatologia esteja disponível desde 1950,

escolheu-se utilizar o período de jan/1970 a dez/1996, em função da disponibilidade de dados observados em toda a área da bacia. As curvas foram construídas para cada mês do ano (janeiro a dezembro) e cada célula do modelo global sobre a bacia do rio São Francisco (30 células), totalizando 360 curvas de probabilidade. A Figura 7.3 apresenta um gráfico com as distribuições de probabilidade válidas para o mês de abril, na célula do modelo atmosférico descrita na Figura 7.2a.

A correção da previsão é feita a partir dessas curvas, como no exemplo apresentado na Figura 7.3. Supondo que para o mês de abril de um dado ano o valor acumulado previsto foi 200mm, a probabilidade associada a esse valor na curva de climatologia do modelo é 0,54. O valor corrigido associado a essa mesma probabilidade é identificado sobre a curva de distribuição de probabilidade das precipitações observadas, ou seja, aproximadamente 110mm. O mesmo procedimento é repetido para todos os meses, em que se deseja corrigir a previsão e considerando, sempre, as curvas válidas para o mês e o ponto da grade considerado.

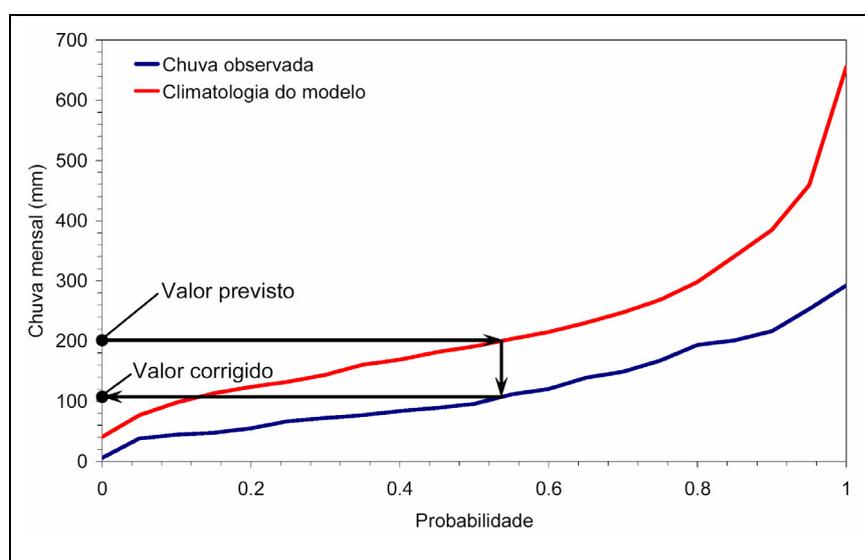


Figura 7.3: Correção nos valores de precipitação prevista com base nas curvas de distribuição de probabilidade acumulada. Célula centrada nas coordenadas 37,5° O e 10,26° S, curvas válidas para o mês de abril. Séries de 1970 a 1996.

Essa metodologia foi aplicada a cada um dos meses do ano e a cada um dos pontos da grade do modelo global do CPTEC que apresentava alguma influência na bacia do rio São Francisco. Para aplicação das correções, os valores de chuva prevista em intervalos de 6 horas

são acumulados para cada mês. Uma vez realizada a correção, são obtidos os valores de chuva total diária empregando-se a mesma distribuição temporal gerada pelo modelo, ao longo do mês em questão.

7.1.2 Avaliação das previsões corrigidas de precipitação

Para análise e comparação das previsões com as chuvas observadas, após as correções dos erros sistemáticos, os valores foram interpolados para a grade adotada no modelo hidrológico, em valores totais diários. A interpolação foi repetida para todas as previsões disponíveis no período de setembro de 1997 a fevereiro de 2003, e os dados foram analisados isoladamente (valores mensais), bem como em totais acumulados ao longo de até N meses, onde N variou entre 1 e 6 meses, correspondente ao horizonte máximo da previsão.

A avaliação das previsões foi realizada para sub-bacias definidas na Figura 6.3, ou seja: rio São Francisco até Três Marias; rio Paracatu até o posto fluviométrico Porto Alegre; rio São Francisco até o posto fluviométrico São Francisco (essa bacia contém as duas primeiras); rio Grande até o posto fluviométrico Boqueirão; rio São Francisco até Sobradinho (essa bacia contém as anteriores) e para a bacia inteira, até a foz.

Na Figura 7.4 são apresentados graficamente os coeficientes de correlação para cada sub-bacia da Figura 6.3 e para cada antecedência das previsões, de 1 mês a 6 meses. Observa-se que em todas as bacias o comportamento é bastante semelhante. De maneira geral, as correlações são menores para o primeiro e quinto mês de previsão (antecedências de 1 e 5 meses), e as antecedências com maior correlação são para três e seis meses. A única exceção é a bacia do rio Grande, que apresenta correlações sempre crescentes a partir de 3 meses de antecedência.

Na Figura 7.5 são apresentadas as séries temporais de chuvas observadas e previstas na sub-bacia do rio São Francisco sobre as áreas contribuintes até Três Marias e Sobradinho. Nestes gráficos são apresentadas as previsões com antecedências constantes de 1 mês (Figura 7.5a,c) e 6 meses (Figura 7.5b,d), onde as linhas cinzas são os 5 membros previstos e a linha preta a média dos mesmos. Estas figuras mostram que os erros das previsões são, em alguns casos, relativamente altos durante o período de pico da estação úmida, como observado nos dois últimos anos do período (2001/2002 e 2002/2003), quando a precipitação é subestimada. Também se observa que o ciclo anual está bem representado, destacando as diferenças entre

as estações secas e úmidas e uma boa representação dos períodos de subida e recessão dos hietogramas. Além disso, verifica-se não haver grandes diferenças entre as antecedências de 1 e 6 meses.

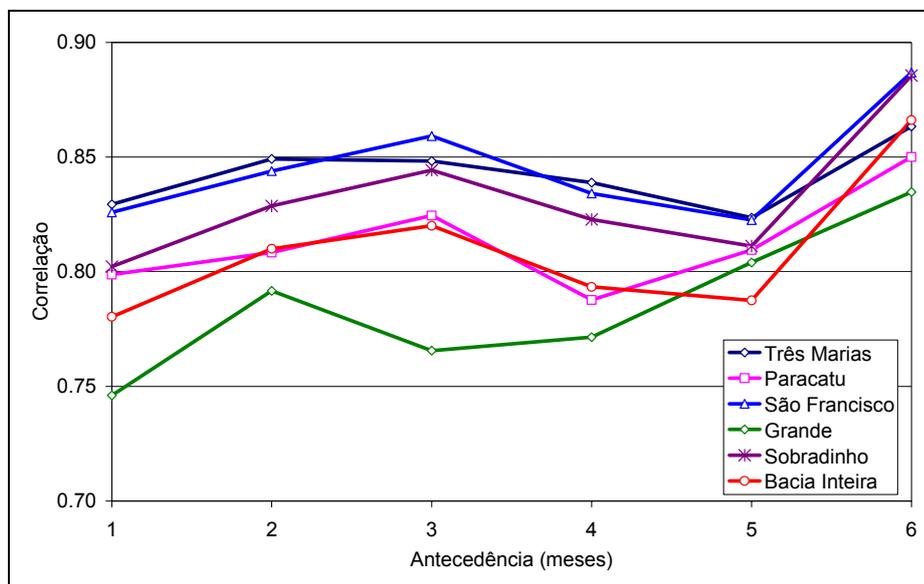


Figura 7.4: Coeficientes de correlação entre as chuvas médias previstas pelo modelo global e as observadas para as diferentes sub-bacias da bacia do rio São Francisco.

Na Figura 7.6 são apresentados os mesmos dados da Figura 7.5, comparados diretamente em gráficos de correlação com chuva observada e a média dos 5 membros previstos. Na Figura 7.6 é apresentada uma linha diagonal tracejada representando o que seria uma previsão perfeita e os pontos azuis para as previsões reais. Observa-se que os pontos da previsão real, de maneira geral, embora apresentem grande dispersão, estão dispostos de forma equilibrada em torno da linha da previsão perfeita, sem apresentar tendências significativas. Em Três Marias (Figura 7.6a,b) nota-se que para 6 meses de antecedência os pontos apresentam menor dispersão e em ambos os gráficos existe uma pequena superestimativa dos valores menores e subestimativa dos valores acima de 200mm (pontos acima e abaixo da linha tracejada, respectivamente). No caso de Sobradinho (Figura 7.6c,d), também é observada uma maior dispersão para antecedência de 1 mês e uma leve tendência de subestimativa para valores maiores que 100mm na Figura 7.6c.

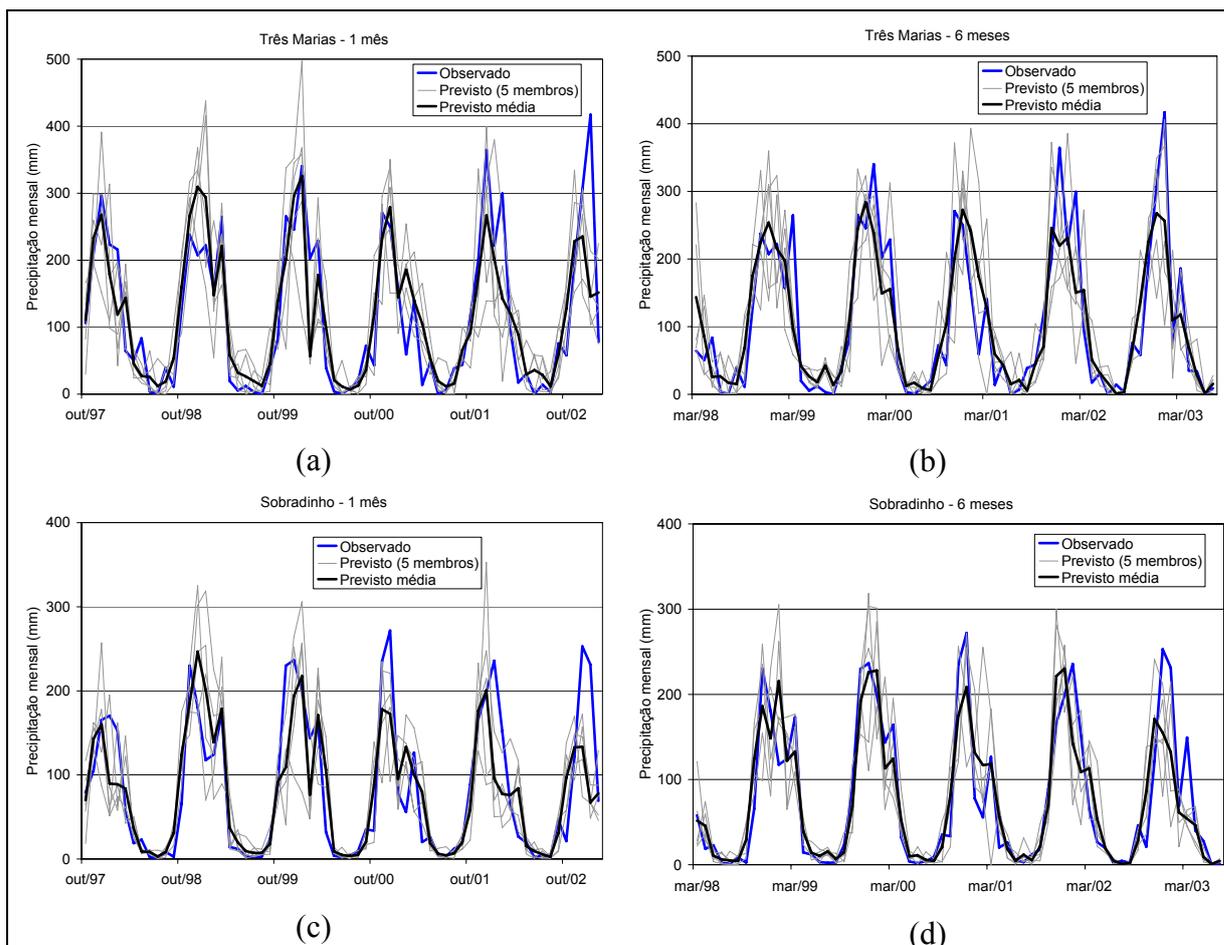


Figura 7.5: Comparação entre as chuvas previstas pelo modelo global do CPTEC e valores observados. Valores médios para a bacia do rio São Francisco até Três Marias (a, b) e Sobradinho (c, d).

Precipitações acumuladas em diferentes horizontes

As mesmas análises de correlações entre chuvas observadas e previstas foram realizadas considerando os valores totais acumulados nos horizontes de 1 a 6 meses. A Figura 7.7 apresenta os coeficientes de correlação das chuvas acumuladas para cada sub-bacia e cada horizonte das previsões, de 1 mês a 6 meses. Observa-se que o coeficiente de correlação aumenta em todas as bacias até o horizonte de 4 meses e, a partir daí, mantém-se aproximadamente constante ou reduzindo um pouco no horizonte de 6 meses. Destaca-se ainda que, os menores valores ocorrem na bacia do rio Grande, para todos os horizontes.

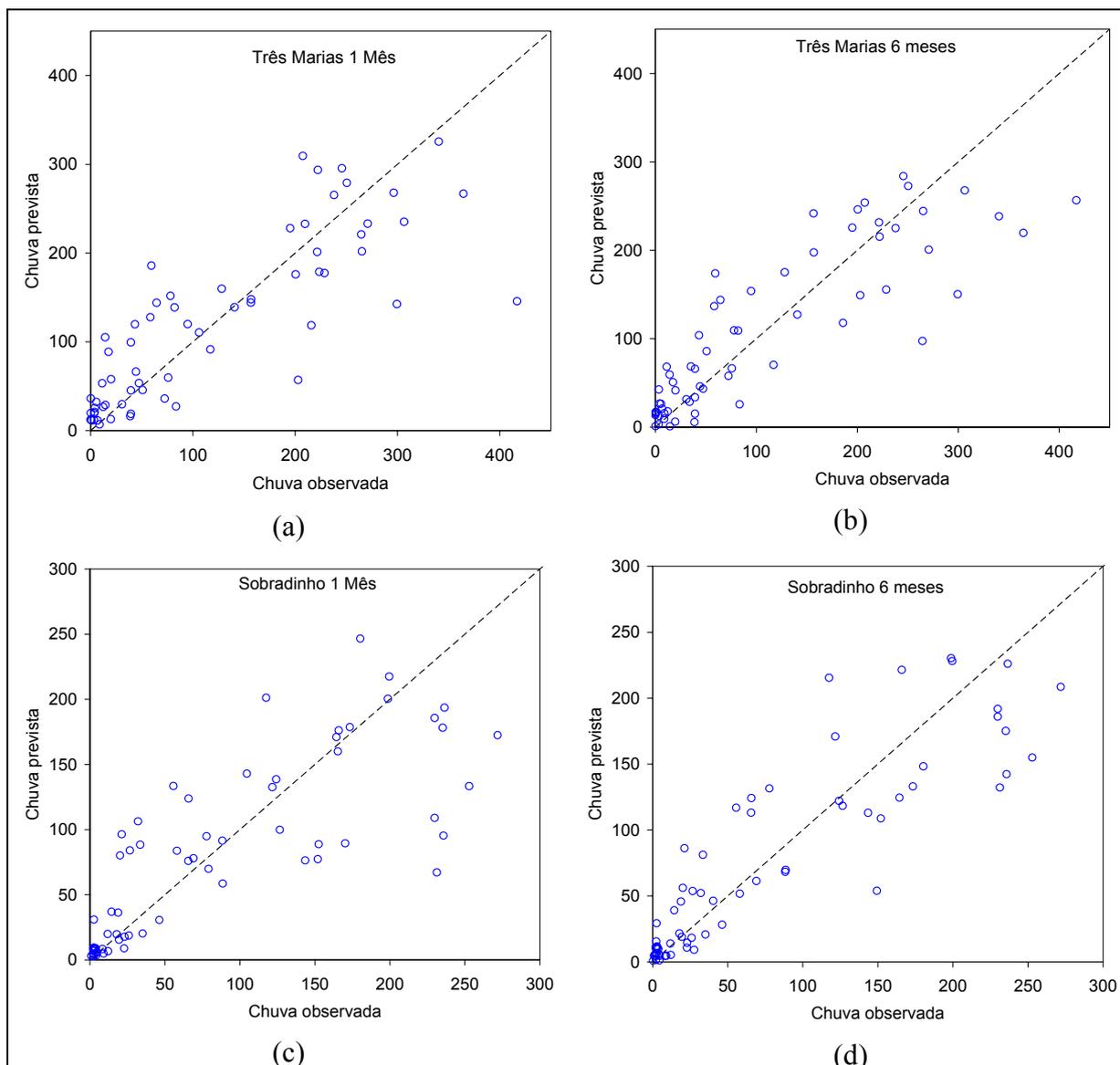


Figura 7.6: Correlação entre chuvas observadas e previstas pelo modelo global do CPTEC na bacia do rio São Francisco: (a,b) até Três Marias e (c,d) até Sobradinho, com 1 e 6 meses de antecedência.

Na Figura 7.8 são apresentadas as chuvas previstas e observadas em valores acumulados trimestrais (soma dos 3 primeiros meses) e semestrais (soma dos 6 meses) na bacia do rio São Francisco até Três Marias e Sobradinho. Observa-se que estes resultados não apresentam melhora significativa em relação às previsões não acumuladas (Figura 7.5).

Para a usina de Três Marias (Figura 7.8a,b) é interessante observar que as previsões são muito boas para os períodos úmidos de 1997/1998 a 1999/2000, tanto para 3 quanto para 6 meses acumulados, mas erram os valores máximos no demais anos. No período 2000/2001, quando as observações foram claramente abaixo da média, as previsões produziram

superestimativa, com maior intensidade para os valores semestrais. Já nos dois últimos períodos chuvosos (2001/2002 e 2002/2003), o modelo apresentou previsões abaixo do observado.

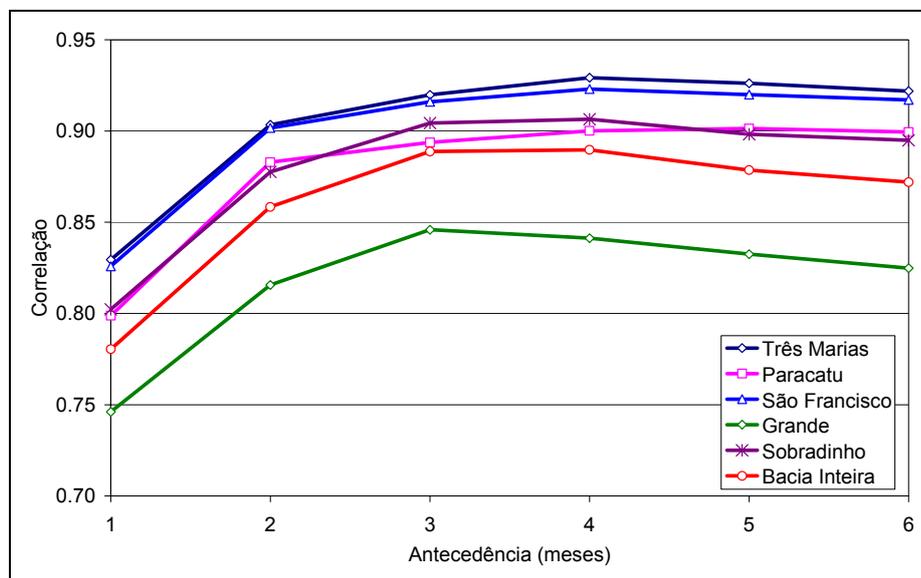


Figura 7.7: Coeficientes de correlação entre as chuvas acumuladas observadas e previstas pelo modelo global para diferentes horizontes de previsão e diferentes sub-bacias.

7.1.3 Redistribuição das precipitações diárias previstas

Conforme já descrito anteriormente, na previsão climática de precipitação, mesmo quando o modelo estima acertadamente a quantidade de chuva em um trimestre ou semestre, a distribuição dessa chuva em valores diários não será correta, muito provavelmente. Isso pode ser comprovado pela Figura 7.9, que apresenta dois membros de uma previsão climática com alcance de 6 meses em valores diários, para uma célula do modelo global do CPTEC sobre a bacia do rio São Francisco. Nesta figura se observa que as previsões apresentam picos de precipitação com intensidades muito semelhantes aos valores observados, mas bastante diferentes em termos de localização temporal. Nota-se também que existe uma grande diferença entre os dois membros da previsão quanto a distribuição temporal da chuva, mostrando que as pequenas diferenças nas condições iniciais conduzem a distribuições bastante distintas.

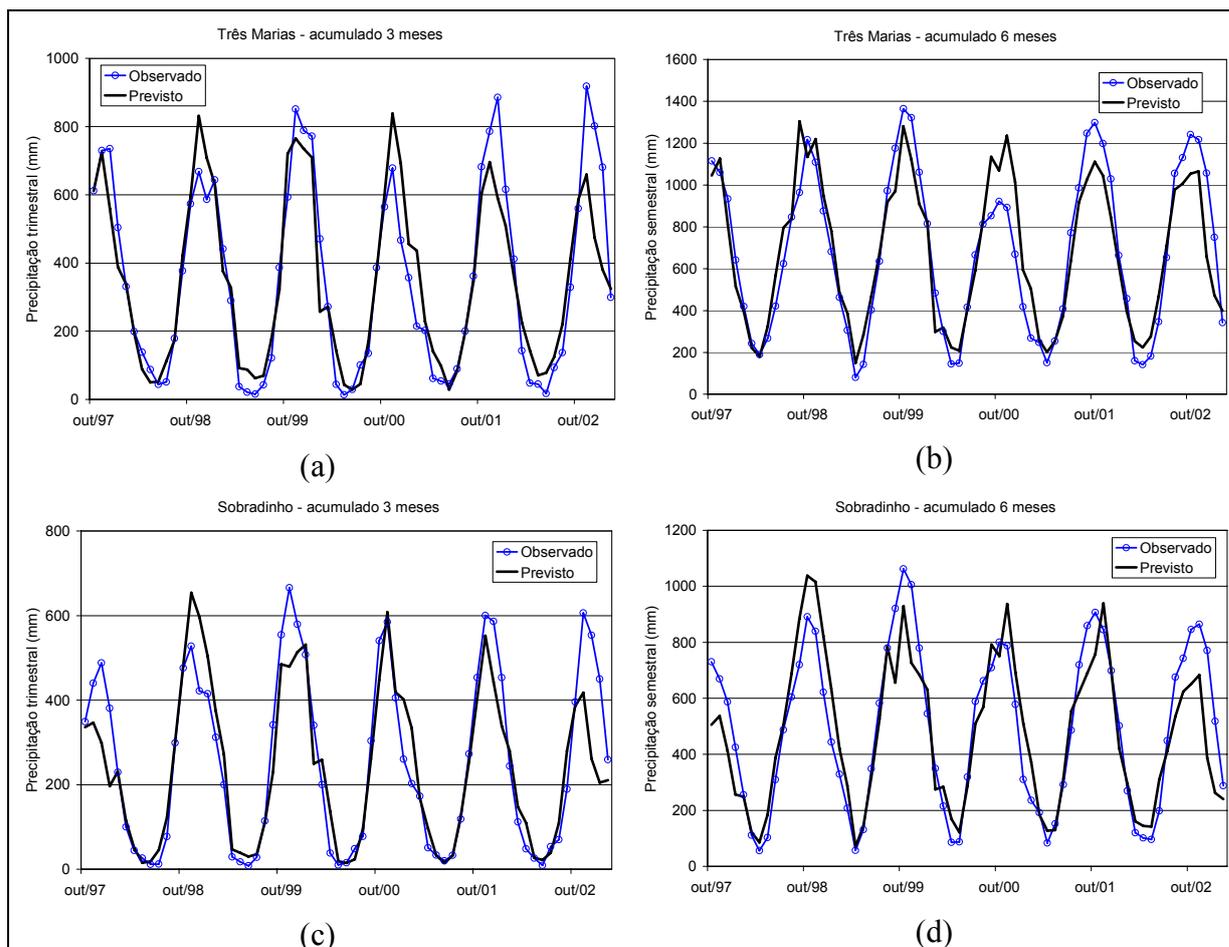


Figura 7.8: Comparação entre as chuvas previstas pelo modelo global do CPTEC (média dos 5 membros) e observadas: Valores acumulados nos 3 e 6 primeiros meses da previsão, médios para a bacia do rio São Francisco até (a,b) Três Marias e (c,d) Sobradinho.

Além da distribuição temporal, outra característica que pode ser importante para aplicações em hidrologia são as intensidades das chuvas previstas. De acordo com Hansen e Indeje (2004), os modelos climáticos dinâmicos tendem a produzir muitos eventos de chuva, com pouca quantidade por evento, podendo provocar distorções quando a previsão é introduzida nos modelos hidrológicos, como o aumento nas perdas por evaporação e redução do escoamento superficial.

Para verificar se as previsões climáticas do modelo global do CPTEC apresentam esse tipo de erro, escolheu-se avaliar a previsão climática de setembro de 1998, ou seja, a previsão que se inicia em 01 de outubro de 1998 e se estende até 31 de março de 1999. Para essa previsão, foram determinadas as curvas de permanência e de chuva acumulada dos valores previstos e observados. Para igualar as escalas, os dados foram tornados adimensionais dividindo-se os valores diários pelo total acumulado no período de 6 meses.

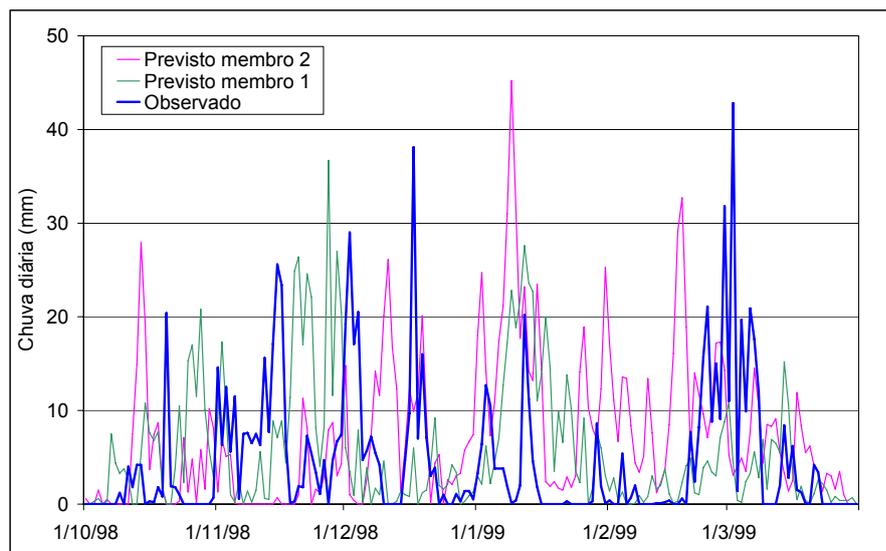


Figura 7.9: Distribuição de chuva diária observada e prevista em uma célula do modelo global do CPTEC sobre a bacia do rio São Francisco. Previsão de 2 membros com alcance de 6 meses a frente.

Os resultados são apresentados na Figura 7.10, para três células do modelo global, uma para a região do Alto São Francisco, outra para o Médio e a terceira no Baixo São Francisco. Nos gráficos da Figura 7.10 as linhas vermelhas correspondem aos valores diários previstos pelo modelo global, a linha em azul corresponde aos valores diários observados (médios na área da respectiva célula do modelo global, de aproximadamente 200x200 km) e a linha verde são valores observados em um único posto pluviométrico dentro dessa mesma área.

Comparando-se as curvas de permanência dos valores previstos e observados médios nas células (linhas azuis), nota-se que o modelo global tende a superestimar os valores mínimos com permanências acima de 40% no Alto e Médio São Francisco e acima de 20% no Baixo São Francisco. Para os valores máximos existe uma subestimativa, mas com magnitude relativa menor do que a superestimativa nos mínimos.

Nas curvas de permanência da Figura 7.10 também se observa que as diferenças são mais pronunciadas quando se considera os dados de pontos localizados na área de cada célula (linhas verdes), mostrando que os valores previstos filtram as variações de intensidade provocadas por efeitos de escala regional, como a orografia por exemplo. Outra consideração importante é que as diferenças são maiores quanto mais ao norte se localizam as células do

modelo global, ou seja, são mais intensos para regiões onde os efeitos tropicais são mais importantes, conforme relatado por IRI (2004a).

Em relação as curvas de precipitação acumulada (Figura 7.10b,d,f) nota-se que não existem grandes diferenças, com exceção da célula do Baixo São Francisco. Isso indica que, nas demais regiões do São Francisco, as diferenças de intensidade nos valores mínimos e máximos das previsões tendem a se compensar, fazendo com que os valores acumulados ao longo do tempo sejam consistentes com os dados observados.

Conforme já descrito neste capítulo, as previsões climáticas de precipitação foram interpoladas para a grade adotada na resolução do modelo hidrológico MGB-IPH. Na Figura 7.11 é apresentado o resultado da interpolação de uma previsão climática, com um mês de antecedência. Essa figura mostra que, devido à baixa resolução espacial do modelo climático global, a distribuição das precipitações previstas é bastante suavizada, como também é demonstrado pela análise pela Figura 7.10. Além disso, se observa que as previsões subestimam os valores observados em algumas regiões e superestimam em outras, de forma que, quando se consideram algumas regiões, ou mesmo toda a bacia, o volume total precipitado pode estar corretamente previsto.

De acordo com as observações discutidas neste item, mesmo que esteja correta a previsão do volume total precipitado sobre a bacia do rio São Francisco, no período de 6 meses por exemplo, a distribuição temporal e espacial deste volume poderá estar muito diferente do real. Estas diferenças poderão ter implicações importantes quando a chuva prevista for utilizada no modelo hidrológico, conforme já salientado nos itens anteriores.

Por estes motivos será testada a redistribuição dos valores diários de precipitação, a fim de verificar se estas limitações do modelo climático global são importantes na previsão de vazões com o modelo hidrológico MGB-IPH. Os critérios adotados na redistribuição da chuva diária são apresentados no item a seguir.

Na tentativa de corrigir estas limitações da previsão climática, alguns trabalhos têm utilizado a redistribuição da chuva prevista, com base em observações do passado. As técnicas utilizadas podem ser bastante simples, como a utilizada por de Wood et al. (2002), onde o total mensal é distribuído segundo a seqüência diária (de um mesmo mês) do histórico observado, ou técnicas estatísticas bastante complexas como descrito por Hansen e Indeje (2004).

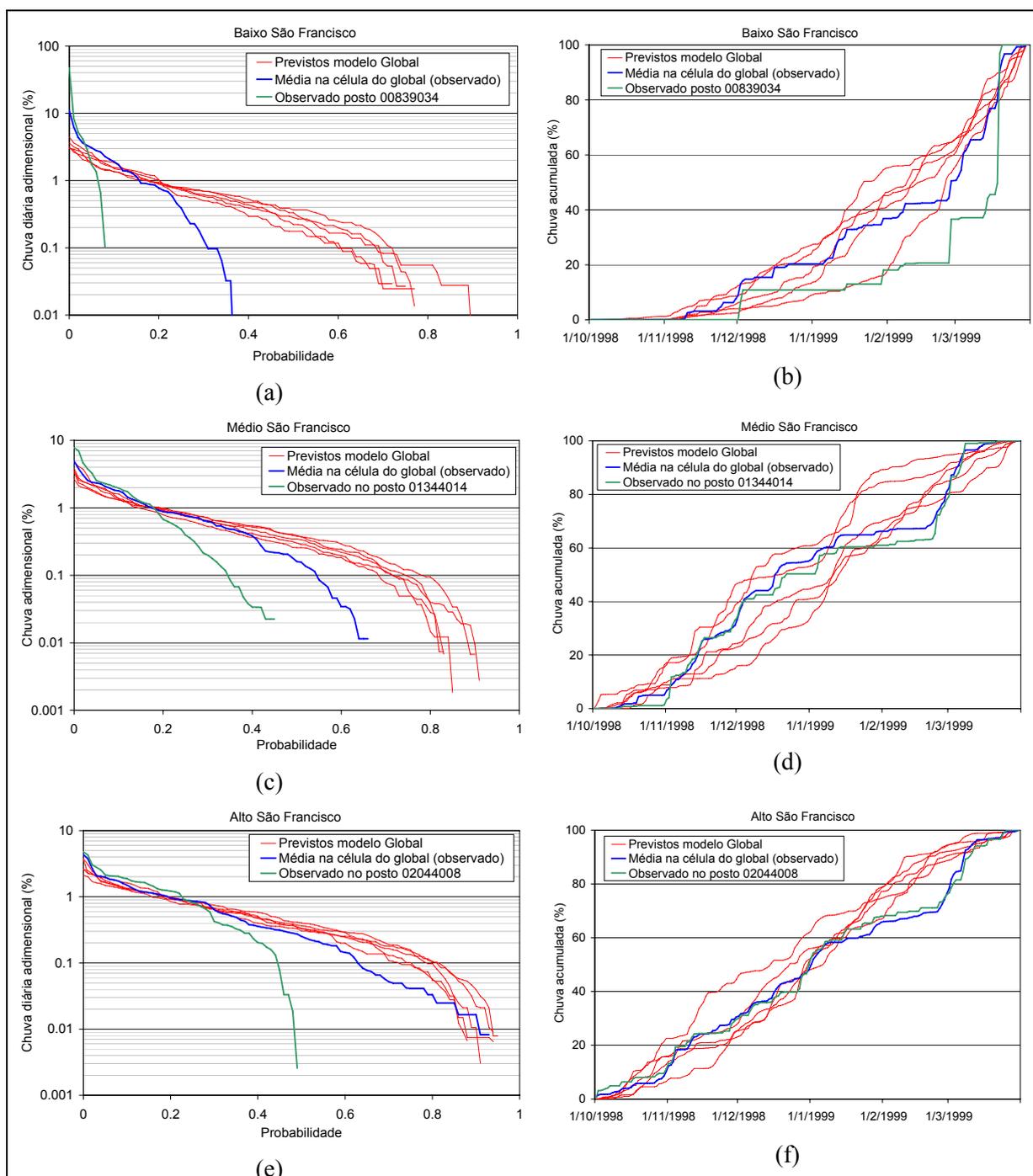


Figura 7.10: Curvas de permanência e de chuva acumulada em valores adimensionais (chuva diária/total semestral), para células do modelo global localizadas nas regiões: (a,b) Baixo São Francisco; (c,d) Médio São Francisco; (e,f) Alto São Francisco. Valores referentes a previsão de setembro de 1998, ou seja, para o período de 1/10/1998 a 31/3/1999.

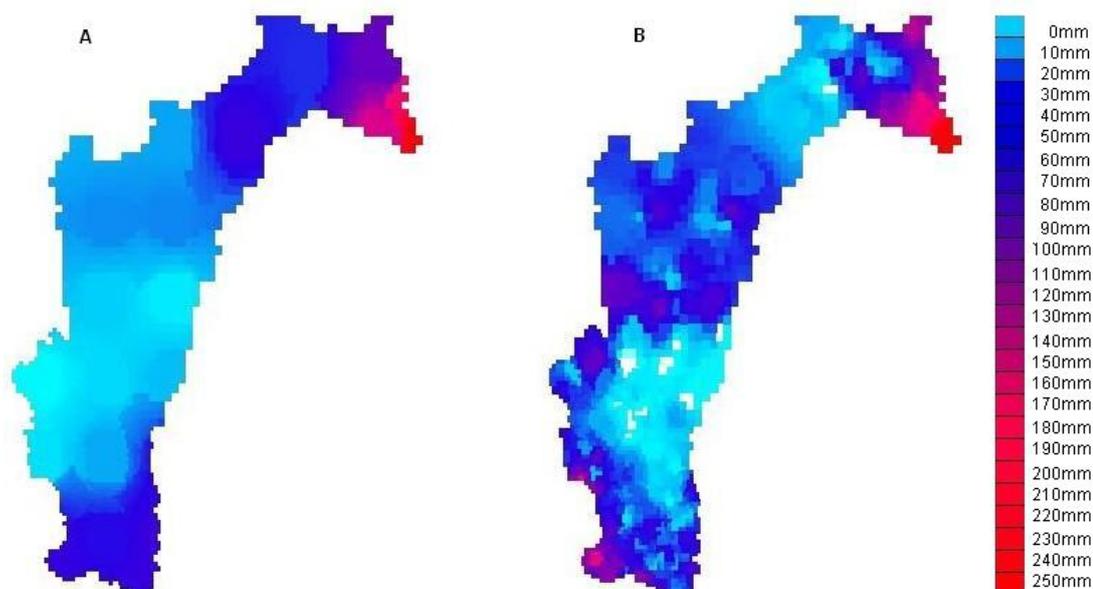


Figura 7.11: (A) Precipitação prevista pelo modelo global do CPTEC e (B) observada interpolada para a grade do modelo hidrológico na bacia do rio São Francisco (previsão para o mês 03/2002 realizada no mês 02/2002).

Nesta pesquisa buscou-se explorar a correção dos valores diários com base procedimentos simples, que redistribuam as previsões em conformidade com o comportamento normalmente observado nas séries históricas. Nas análises das correlações entre chuva prevista e observada (Figura 7.4 e Figura 7.7), se nota que os resultados são melhores para valores acumulados de três a seis meses. Embora a Figura 7.7 mostre que as correlações para chuva acumulada até Três Marias e São Francisco sejam maiores do que até Sobradinho, Marengo et al (2003) mostra que o modelo AGCM do CPTEC tem menor previsibilidade na região até o posto fluviométrico São Francisco.

Dessa forma, para realizar a redistribuição considerou-se que as previsões climáticas na bacia do rio São Francisco são melhores quando analisados os valores os totais semestrais da chuva média sobre a área total da bacia. Entretanto, como as previsões de vazão desta pesquisa terão prioridade até a usina de Sobradinho, será considerado o total semestral da chuva média até Sobradinho e não sobre toda a bacia.

Foram adotados dois critérios para a redistribuição da chuva prevista com horizonte de 6 meses, descritos a seguir:

Critério 1. *Redistribuição com base no total semestral previsto sobre a bacia do rio São Francisco até Sobradinho.* Consiste das seguintes etapas:

- i) Para cada previsão climática do período de outubro de 1997 a fevereiro de 2003, são calculadas as precipitações previstas em valores acumulados de seis meses, sobre a área até a usina de Sobradinho. Estes valores foram determinados no item 7.1.2, são apresentados na Figura 7.8d e correspondem à média dos cinco membros do conjunto;
- ii) Interpolação da chuva diária observada na bacia do rio São Francisco para a grade do modelo global, no período de 1950 a 1996. Utilizando o mesmo processo de interpolação para os dados do período de previsão (item 7.1.2);
- iii) Usando os dados interpolados em (ii), são calculados o totais de chuva semestral precipitado sobre a área contribuinte a usina de Sobradinho, para cada mês do período 1950 a 1996. Ou seja, para janeiro de 1950 são somados os valores de 01/01/1950 a 30/06/1950, para fevereiro de 1950 são somados os valores de 01/02/1950 a 31/07/1950, e assim sucessivamente. Obtêm-se ao final uma série de chuvas “totais móveis” de seis meses no período de 1950 a 1996;
- iv) Para cada previsão semestral do período de janeiro de 1997 a fevereiro de 2003, busca-se na série histórica de valores acumulados do item (iii) um conjunto de dados observados com valor próximo ao previsto. São escolhidos os valores da série histórica que correspondem aos mesmos meses de cada previsão, ou seja, para uma previsão com início no mês janeiro (alcance até junho) são verificados os somente os totais históricos que se iniciam no mês de janeiro;
- v) Adotou-se a escolha de um conjunto de cinco valores semelhantes no histórico, uma vez que o objetivo é somente redistribuir os valores diários e não fazer uma nova previsão. Por isso, o critério de seleção é simplesmente escolher os cinco valores mais próximos ao previsto;
- vi) Escolhido o conjunto de cinco valores semestrais do histórico, os totais de 6 meses são desagregados em valores diários selecionando-se os respectivos dados diários já interpolados (do item ii) para toda a bacia do rio São Francisco. Estas são as novas previsões climáticas com seis meses de antecedência e intervalo diário. Os totais semestrais se mantêm muito próximos aos valores previstos.

Critério 2. *Redistribuição com base no total semestral previsto sobre a bacia do rio São Francisco até Sobradinho e a fase do Índice de Oscilação Sul (SOI).*

Nesse critério foi considerada a conclusão obtida por Pinto (2005), que em pesquisa sobre a previsão de vazões no Alto São Francisco com base no Índice de Oscilação Sul (SOI) conclui que: “O SOI parece não influenciar os volumes precipitados na bacia, mas afeta a distribuição temporal das chuvas durante o período chuvoso”.

O SOI é um índice que mede a diferença dos desvios da pressão atmosférica entre o Taiti e a cidade de Darwin, na Austrália. A série desse indicador oceânico é frequentemente usada em modelo de previsão que correlacionam o SOI com chuva ou vazão.

Devido as conclusões de Pinto (2005), nesse critério são realizadas as mesmas etapas do Critério 1, mas com a diferenças que também é considerada a persistência da fase do SOI, ou seja, normal, abaixo do normal e acima do normal. Portanto, antes de todas as etapas já descritas, são determinadas as fases do SOI para o período de previsão e do histórico de 1950 a 1996. Na etapa (iv) são escolhidos os valores históricos semelhantes ao total semestral previsto, mas somente aqueles quando a fase do SOI foi igual à observada no último trimestre antes da previsão. A série utilizada de valores do SOI é apresentada no ANEXO E.

Ressalta-se que, a redistribuição dos valores diários foi realizada considerando-se somente a média do conjunto de 5 membros gerados pelo modelo AGCM do CPTEC. Uma vantagem adicional deste procedimento é que permite também a correção da distribuição espacial da chuva prevista, uma vez que usa um conjunto de dados observados do passado. Os métodos estatísticos baseados em desagregação estocástica, por exemplo, seriam bastante complexos de serem usados em toda a bacia, pois a manutenção da correlação temporal e espacial da precipitação torna os métodos paramétricos extremamente pesados numericamente.

Na Figura 7.12 são apresentados os valores semestrais selecionados para os dois modelos de redistribuição descritos.. Pela Figura 7.12a nota-se que os valores históricos selecionados com base somente na previsão do modelo AGCM são bastante semelhantes. As maiores diferenças ocorrem no período chuvoso de 1997/1998, quando o modelo climático fez uma forte subestimativa. Neste caso, não foram encontrados valores semelhantes no histórico e o modelo de redistribuição adotou os valores mais próximos, corrigindo a subestimativa do modelo climático.

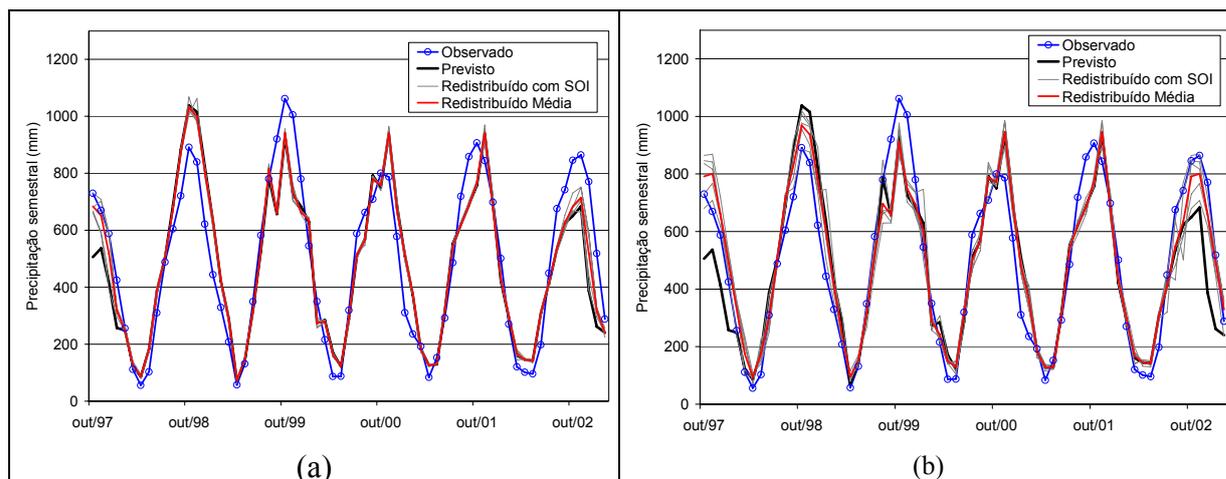


Figura 7.12: Conjuntos de precipitação semestral prevista para a bacia do rio São Francisco até Sobradinho, selecionados do histórico com base em: (a) valores previstos pelo modelo AGCM; (b) item (a) e fases do SOI.

No caso da redistribuição com base nas fases do SOI (Figura 7.12b), também se verificou esse efeito, porém com maior intensidade. Foram corrigidas as subestimativa dos verões de 1997/1998 e 2002/2003, e houve uma redução na superestimativa de 1998/1999. Estes resultados mostram que a adição da informação sobre a fase do SOI já apresenta um benefício interessante nas previsões, pois pode ter influência também na quantidade de chuva sobre a bacia do rio São Francisco.

Apesar destes resultados interessantes nos valores acumulados de 6 meses, o objetivo principal da redistribuição foi melhorar a previsão para as menores antecedências, tanto mês a mês quanto nos valores acumulados. Para isso, na Figura 7.13 são avaliadas as previsões resultantes das redistribuições para as diferentes antecedências mensais, em termos de coeficientes de correlação.

Nas previsões para antecedências mês a mês em Sobradinho (Figura 7.13a), se verifica que os dois modelo de redistribuição apresentam melhora na correlação com os dados observados, mas quando se considera a persistência da fase do SOI os resultados foram mais promissores, aumentando de forma significativa a correlação para antecedências até 4 meses. Estes resultados de Sobradinho se repetem para as antecedências acumuladas (Figura 7.13c), onde as melhores correlações são para os valores acumulados de trimestrais e quadrimestrais (chuva total nos 3 e 4 primeiros meses da previsão), com correlações maiores que 95%.

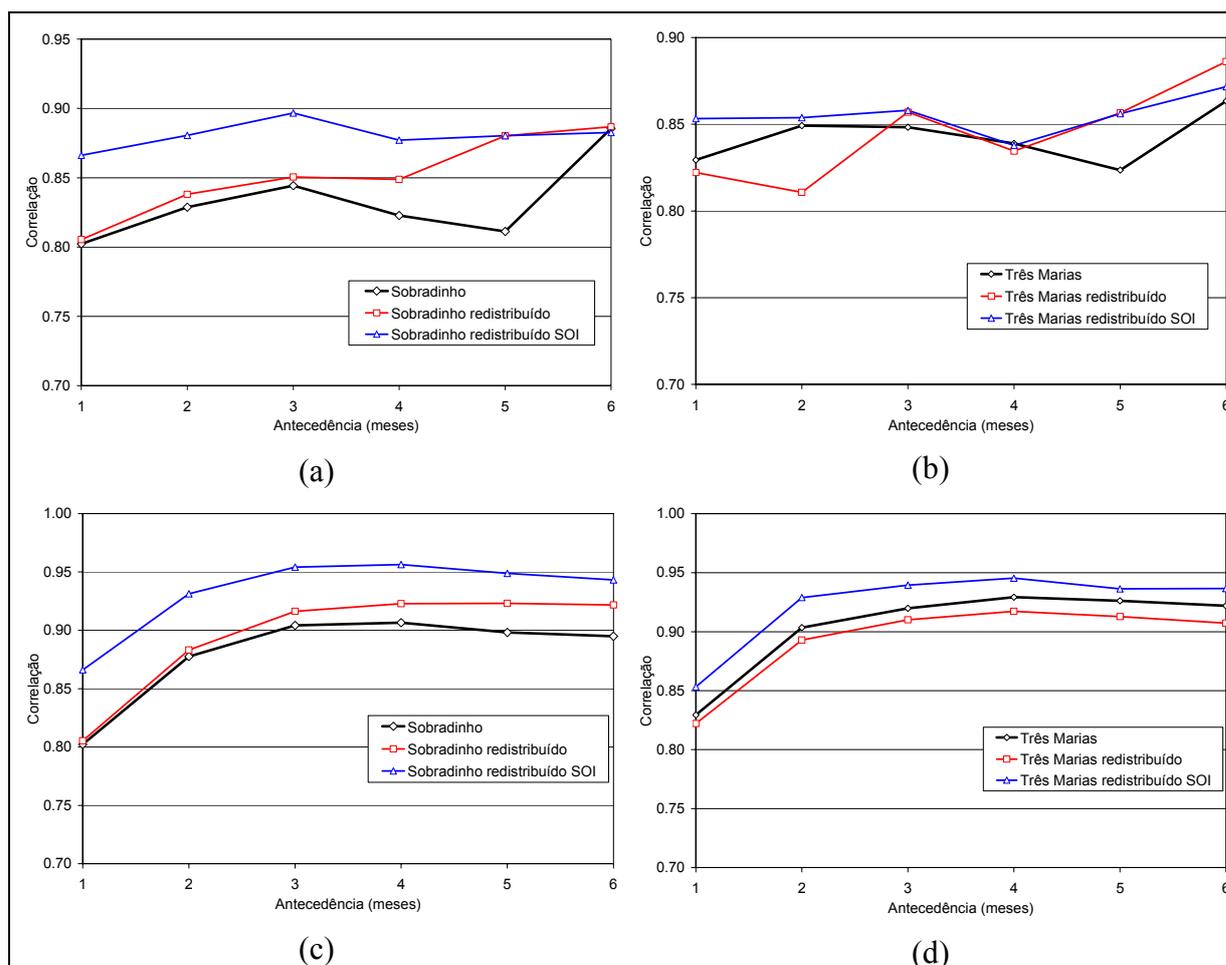


Figura 7.13: Correlações entre precipitação prevista e observada, comparando-se as previsões originais do modelo AGCM e os valores redistribuídos, para as áreas até Três Marias e Sobradinho: (a,b) valores mês a mês; (c,d) valores acumulados de 1 a 6 meses.

Para a bacia contribuinte até a usina de Três Marias a redistribuição apresentou menor contribuição, os resultados (Figura 7.13b,d) mostram que a fase do SOI melhora um pouco as correlações, mas com menor intensidade do que em Sobradinho. Nos valores de antecedência acumulada (Figura 7.13d) a redistribuição sem a fase do SOI reduz a correlação, por apresentar piores resultados para os valores do primeiro bimestre da previsão.

As previsões até Sobradinho também foram avaliadas pelo cálculo da raiz quadrada do erro médio quadrático (*RMSE*), definido pela Equação 7.1, e os resultados são apresentados na Figura 7.14. Nesta figura, nota-se que a redistribuição com base nas fases do SOI reduz o *RMSE* em todas as antecedências, com exceção de 6 meses (Figura 7.14a). Mas, os resultados mais expressivos são obtidos para as previsões com antecedências acumuladas (Figura 7.14b), que mostram que a redistribuição com base no SOI reduziu os valores de *RMSE* em até 30%, no caso de precipitações trimestrais e quadrimestrais sobre a área contribuinte de Sobradinho.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{prev} - P_{obs})^2} \quad (7.1)$$

Onde: n é número de previsões; P_{prev} são as precipitações previstas e P_{obs} são as precipitações observadas.

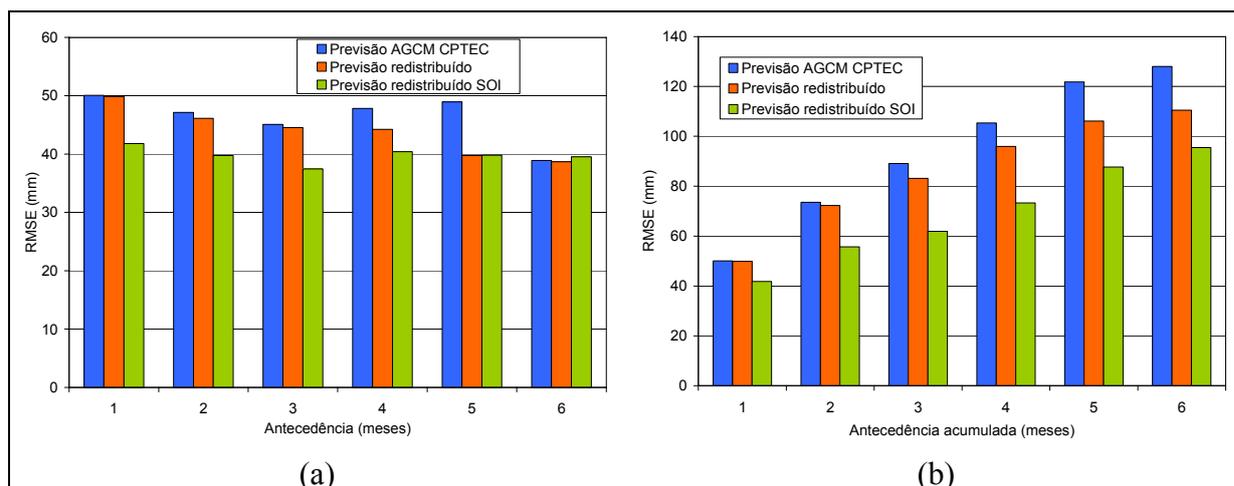


Figura 7.14: Valores de RMSE da chuva prevista sobre a bacia até Sobradinho, comparando-se as previsões originais do modelo AGCM e os valores redistribuídos: (a) valores mês a mês; (b) valores acumulados de 1 a 6 meses.

Conforme os resultados apresentados neste item, a metodologia de redistribuição dos valores diários da previsão climática, baseado nos volumes semestrais sobre sobradinho, apresentou benefícios importantes, corrigindo não somente a distribuição temporal dos valores mensais, mas também a quantidade prevista. No capítulo seguinte deverão ser avaliados os efeitos destas modificações sobre as previsões de vazão, que ainda poderá sofrer influência das correções de intensidade e distribuição espacial, que não foram avaliados neste item por serem inerentes ao processo de redistribuição adotado.

7.2 Previsões Climáticas do Modelo ETA (CPTEC/INPE)

Utilizando as condições de contorno disponibilizadas pelas previsões realizadas com o modelo global do CPTEC, o modelo regional ETA forneceu previsões de precipitação em uma grade de maior resolução espacial, com pontos distanciados de 0,4 graus em longitude e

latitude, correspondendo a células de aproximadamente 40 por 40km. O Modelo Regional Climático ETA tem gerado previsões sazonais sobre América do Sul na resolução de 40 km desde dezembro de 2001. O modelo tem a configuração igual a do modelo climático regional operacional, cobrindo a maior parte da América do Sul e parte dos oceanos adjacentes.

O modelo possui 38 camadas na vertical, sendo que a primeira camada do modelo ETA possui apenas 20 m. As condições de contorno laterais são provenientes do modelo climático AGCM do CPTEC. Estas condições são atualizadas a cada 6 horas, sendo que as tendências nos contornos laterais são interpoladas linearmente neste intervalo. A umidade do solo é proveniente de uma climatologia mensal, enquanto que o albedo de uma climatologia sazonal. A temperatura da superfície do mar é inicializada com a climatologia observada do mês, persistindo a anomalia mensal durante a integração. As variações diárias do albedo, umidade do solo e temperatura da superfície do mar são geradas a partir de interpolação linear. O modelo foi integrado para os meses chuvosos, de outubro a abril dos anos de 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, por diferentes prazos de integração. As integrações ganharam as denominações apresentadas na Tabela 7.1.

Foram gerados 5 membros para cada rodada. O membro tomado como controle foi iniciado no dia 15 do mês anterior ao mês de início da integração. Os demais membros foram gerados a partir de perturbações na física de produção de chuvas convectivas. Essa forma de gerar membros procura reduzir os erros sistemáticos do modelo.

Tabela 7.1: Períodos de previsão do modelo ETA

Rodada	Período de Integração
OND	Out-Nov-Dez-Jan-Fev-Mar
NDJ	Nov-Dez-Jan-Fev-Mar-Abr
DJF	Dez-Jan-Fev-Mar-Abr
JFM	Jan-Fev-Mar-Abr
FMA	Fev-Mar-Abr

7.2.1 Avaliação das Previsões Climáticas de Precipitação do Modelo ETA

De forma semelhante ao modelo global climático, para análise e comparação das previsões com as chuvas observadas, estes dados foram inicialmente interpolados para a grade adotada no modelo hidrológico, em valores totais diários, e depois acumulados em valores mensais. A Figura 7.15 apresenta os valores interpolados e observados para a chuva ocorrida

no mês 01/1999 e prevista no mês 12/1998 pelo modelo ETA, ou seja, com 1 mês de antecedência.

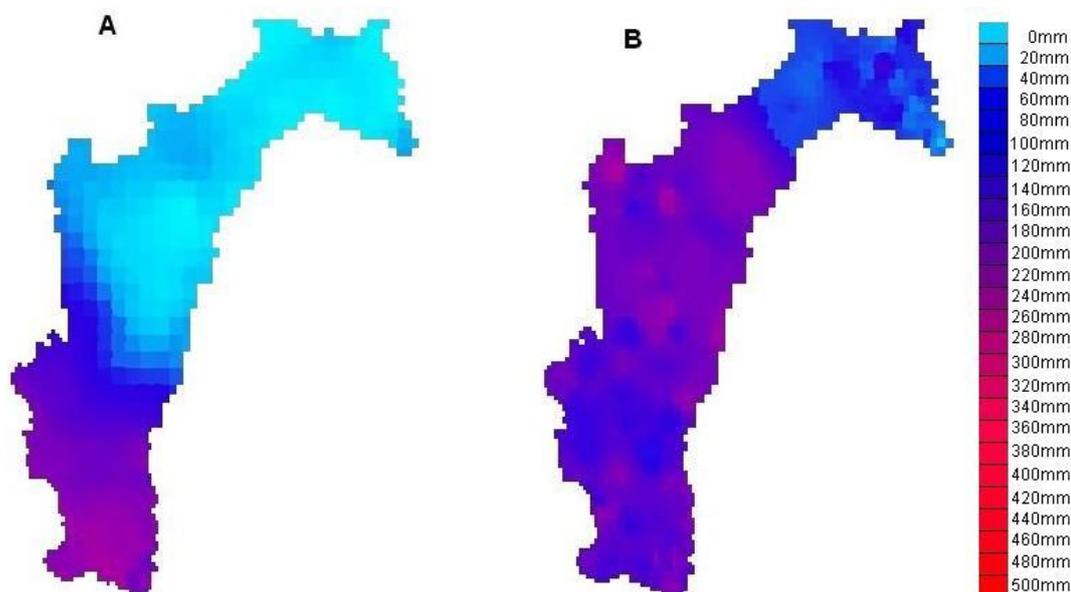


Figura 7.15: Precipitação prevista pelo modelo ETA (A) e observada (B) interpolada para a grade do modelo hidrológico na bacia do rio São Francisco (previsão para o mês 01/1999 realizada no mês 12/1998).

Conforme já descrito, nas análises das previsões do modelo global, as comparações entre chuvas previstas e observadas foram realizadas para os valores médios nas sub-bacias representadas na Figura 6.3. Os valores médios na área de cada sub-bacia foram determinados pela média aritmética da chuva interpolada nas células do modelo hidrológico, para cada intervalo de tempo.

A Figura 7.16 apresenta as séries temporais de chuvas observadas, juntamente com as previstas pelo modelo climático ETA na sub-bacia do rio São Francisco até a usina de Três Marias e Sobradinho, com as antecedências constantes de 1 e 3 meses. Estes mesmos resultados são apresentados comparando-se diretamente em gráficos de correlação na Figura 7.17.

Na Figura 7.16 nota-se que os erros das previsões são relativamente altos, mas não apresentam evidências de serem sistemáticos, uma vez que, em alguns anos superestimam e em outros subestimam os valores observados. Nos gráficos de correlação (Figura 7.17), verifica-se que ocorre uma grande dispersão dos pontos, em relação a previsão perfeita, mas,

de modo geral, estes pontos se distribuem igualmente acima e abaixo da linha tracejada, indicando a ausência de erros sistemáticos. Dessa forma, as previsões climáticas do modelo ETA não passaram pelo processo de correção deste tipo de erro.

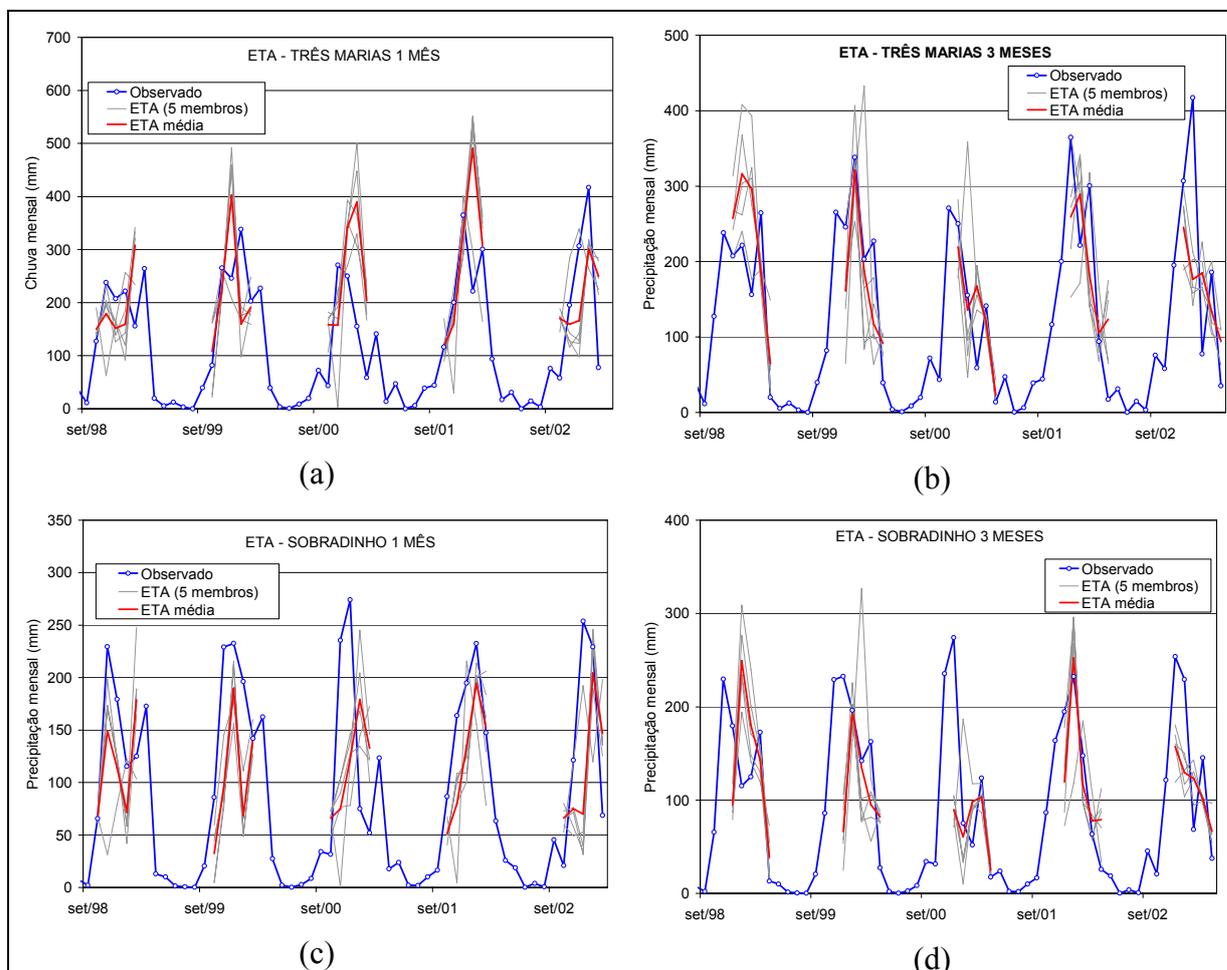


Figura 7.16: Comparação entre as chuvas previstas pelos modelos ETA e valores observados. Valores médios de chuva para a bacia do rio São Francisco até a usina de Três Marias. Previsões com antecedência constante de 1 mês e 3 meses.

A qualidade das previsões foi avaliada para cada sub-bacia e para cada tempo de antecedência através do cálculo do coeficiente de correlação entre a chuva prevista e a observada. A Figura 7.18 apresenta os coeficientes de correlação para cada sub-bacia e para cada antecedência das previsões do modelo ETA.

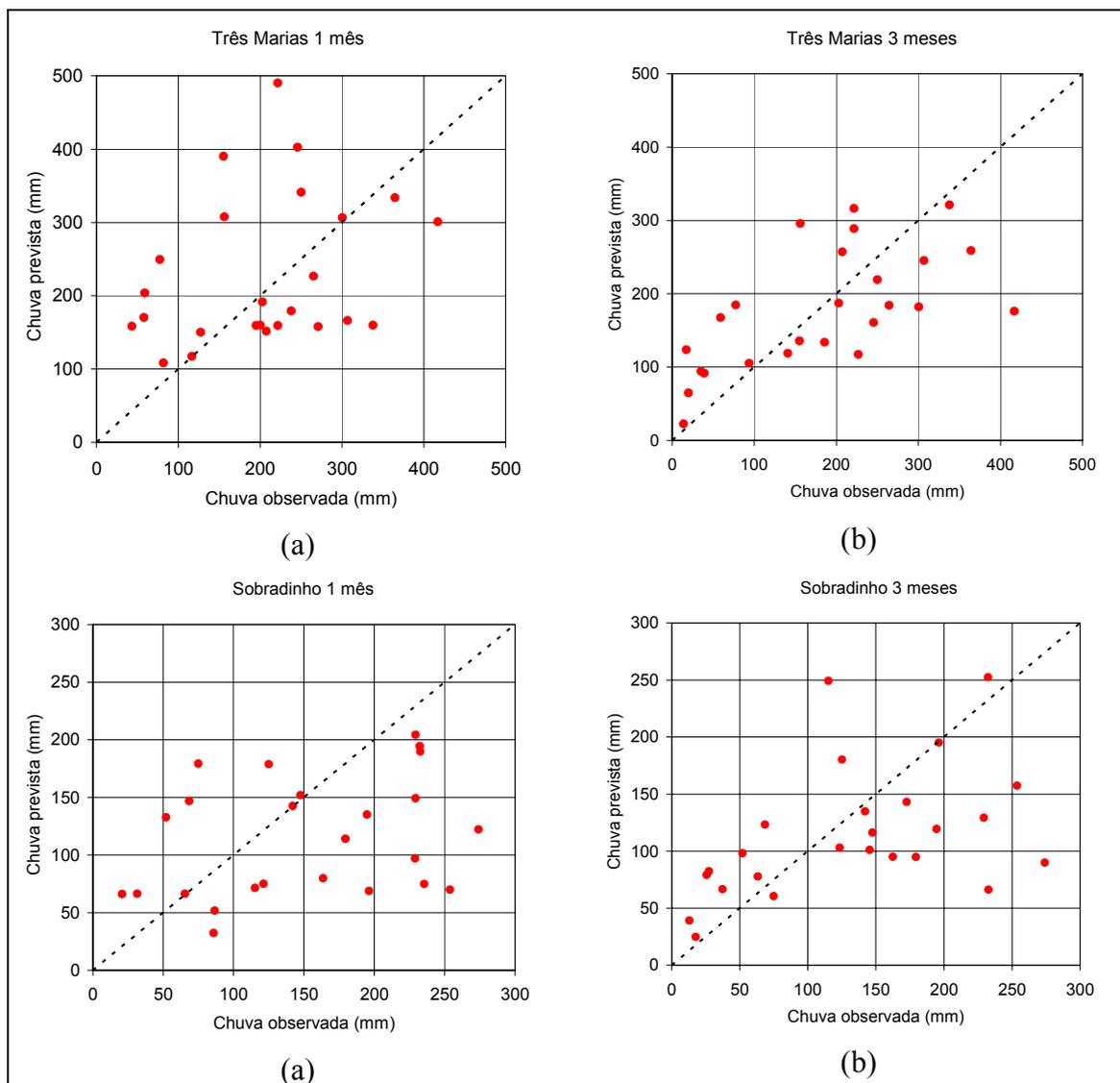


Figura 7.17: Correlação entre chuvas observadas e previstas pelos modelos ETA na bacia contribuinte até Três Marias, com antecedência de 1 e 3 meses.

Observa-se que, em todas as bacias, o comportamento é bastante semelhante, em cada resolução. De maneira geral, as correlações são baixas e com menores valores para os dois primeiros meses de previsão, apresentando inclusive correlações negativas para 2 meses de antecedência. Os maiores valores de correlação são observados para tempos maiores ou iguais a três meses, contrariando o que normalmente se esperaria das previsões. Deve-se ressaltar que as antecedências de 5 e 6 meses possuem menos dados do que as demais, em virtude da diferença de antecedência adotada para as previsões do ETA, descritas pela Tabela 7.1.

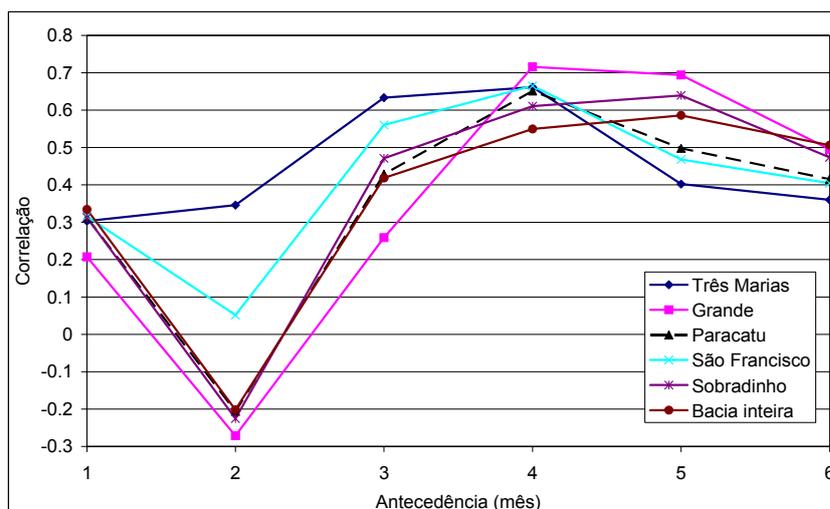


Figura 7.18: Coeficientes de correlação entre as chuvas médias previstas pelo modelo ETA e os valores observados para as diferentes sub-bacias da bacia do rio São Francisco.

As mesmas análises de correlações entre chuvas observadas e previstas foram realizadas considerando os valores totais acumulados em intervalos de 1 a 6 meses. A Figura 7.19 apresenta as chuvas acumuladas previstas e observadas dos 3 primeiros meses na bacia do rio São Francisco até Três Marias e Sobradinho. Observa-se que estes resultados não apresentam melhora em relação as previsões não acumuladas (Figura 7.16).

De maneira geral, os erros nas previsões são levemente amenizados quando se consideram os valores acumulados de 3 meses. Os maiores erros são notados na superestimativa do período úmido 2000/2001 e a subestimativa do período 2002/2003. Estas características se tornam mais evidentes nas previsões de chuva média acumulada em 3 meses sobre a bacia até Sobradinho (Figura 7.19b), onde o modelo ETA apresenta tendência de subestimativa para a maioria dos períodos, além de um atraso na ocorrência dos eventos.

A Figura 7.20 apresenta os gráficos de correlação entre as chuvas acumuladas (3 meses) observadas e previstas pelo ETA para Três Marias e Sobradinho. Em ambas usinas se observa que existe grande dispersão nos pontos, em relação à previsão perfeita (linha tracejada). Para a usina de Sobradinho destaca-se que as previsões acumuladas do modelo ETA tendem a subestimar as vazões a partir do horizonte de 3 meses.

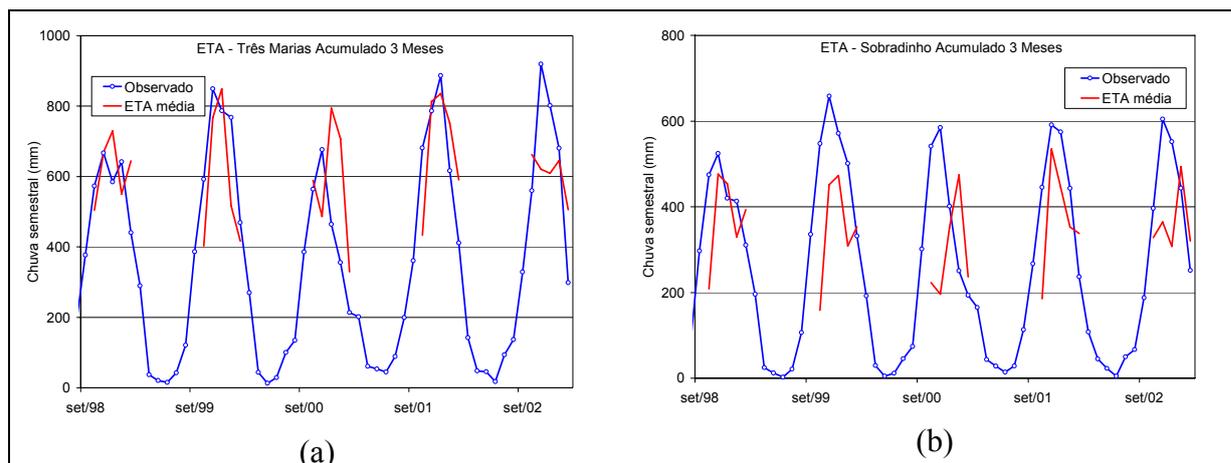


Figura 7.19: Comparação entre as chuvas previstas pelo modelo ETA (média de 5 membros) e valores observados. Valores acumulados dos 3 primeiros meses de cada previsão, médios para a bacia do rio São Francisco até Três Marias e Sobradinho.

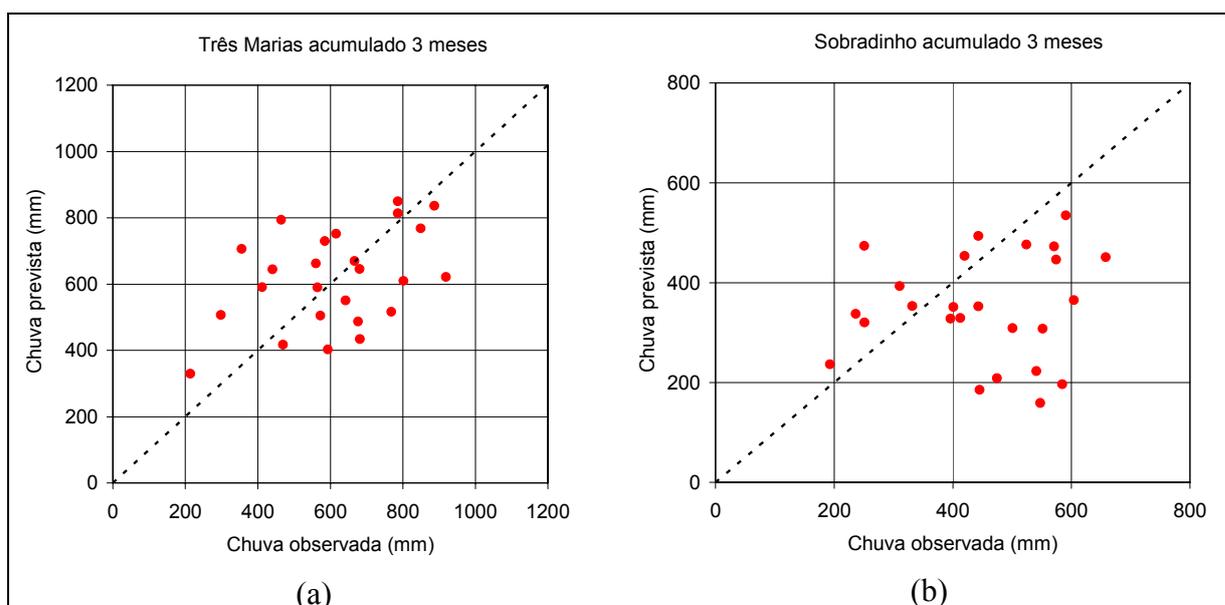


Figura 7.20: Correlação entre chuvas observadas e previstas pelo modelo ETA na bacia contribuinte até a usina de Três Marias. Valores de totais acumulados de 3 meses.

A Figura 7.21 apresenta os coeficientes de correlação das chuvas acumuladas para cada sub-bacia e cada horizonte das previsões, de 1 mês a 6 meses. Observa-se que o coeficiente de correlação tende a ser pior quando se analisam os valores acumulados, reduzindo-se os valores e aumentando a dispersão entre as sub-bacias. As maiores correlações ocorrem entre 3 e 5 meses acumulados e, de maneira geral, as piores são observadas para totais de 2 meses. Novamente, destaca-se que os menores valores ocorrem na bacia do rio Grande, para todos os horizontes considerados. Isso se deve, provavelmente, à baixa

densidade e a distribuição irregular dos postos pluviométricos na bacia do rio Grande, que prejudicam os cálculos das correlações entre valores observados e previstos.

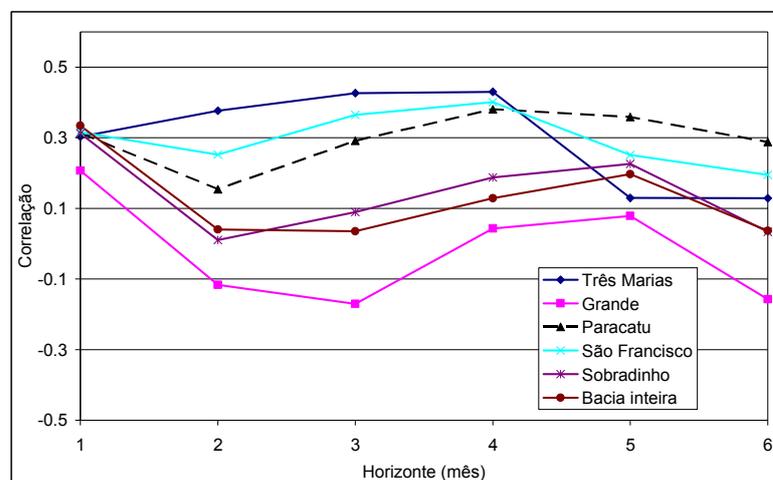


Figura 7.21: Coeficientes de correlação entre as chuvas previstas pelo modelo ETA e as observadas para as diferentes sub-bacias da bacia do rio São Francisco, em valores acumulados para diferentes horizontes.

7.3 Resumo do Capítulo

As previsões climáticas do modelo AGCM do CPTEC apresentam erros sistemáticos de superestimativa da precipitação em toda a bacia do rio São Francisco. De maneira geral, a região norte da bacia apresentou maiores superestimativas, mas o modelo representou bem a variabilidade interanual, ou seja, distinguiu claramente os anos secos e úmidos. Na região sul da bacia, junto às cabeceiras, as superestimativas são menores, mas o modelo não representou bem a variabilidade interanual.

Os erros sistemáticos, em toda a bacia, foram corrigidos pela técnica baseada nas distribuições empíricas de probabilidade. As correções foram feitas para os valores mensais, utilizando a climatologia do modelo AGCM do CPTEC (1950 a 1996), para cada ponto de grade do modelo. A chuva prevista corrigida apresenta correlações altas com a chuva observada, mas se observam erros de grande magnitude durante os períodos úmidos.

Avaliou-se a distribuição temporal da chuva prevista diária do modelo AGCM e se verificou que o modelo tende a superestimar as menores precipitações e subestimar os

máximos diários. De maneira geral, esse comportamento é mais evidente nas células ao norte da bacia.

Para corrigir a distribuição temporal e espacial da chuva prevista, foi testado um modelo de redistribuição da chuva diária prevista, baseado em valores semelhantes do passado. O modelo de redistribuição permitiu uma redução dos erros médios da chuva prevista para Sobradinho, principalmente nos valores trimestrais e quadrimestrais.

As previsões de precipitação geradas pelos modelos climáticos regionais ETA não apresentaram erros sistemáticos sobre a bacia do rio São Francisco. Dessa forma, essas previsões de precipitação não passaram por qualquer processo de correção estatística. De maneira geral, os resultados do modelo regional foram inferiores aos obtidos com o modelo global, apresentando grandes superestimativas em todas as antecedenças.

8 PREVISÕES DE VAZÃO DE LONGO PRAZO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

8.1 Previsões de Vazão Baseadas nas Previsões Climáticas do modelo AGCM do CPTEC

As previsões de precipitação do modelo global, corrigidas e interpoladas de acordo com a metodologia descrita nos itens anteriores, foram utilizadas como dados de entrada para o modelo hidrológico, gerando previsões de vazão com até 6 meses de antecedência. Estas previsões foram realizadas iniciando sempre no dia 1º de cada mês, estendendo-se pelos 6 meses seguintes em intervalo de tempo diário. Até o último dia antes do início da previsão foram utilizadas, como dados de entrada do modelo hidrológico, as chuvas observadas nos postos pluviométricos, interpoladas para as células do modelo hidrológico.

Até o último dia antes do início da previsão também é realizada a atualização das variáveis de estado do modelo hidrológico, como as vazões dos rios e o armazenamento de água nos reservatórios lineares simples que representam a água contida nos aquíferos.

Para realizar as previsões do período de seis meses entre outubro de 1998 e março de 1999, por exemplo, o modelo hidrológico foi iniciado no dia 05 de junho de 1993, e rodado com dados de chuva observada até o dia 30 de setembro de 1998. A partir do dia 1º de outubro de 1998 o modelo passou a utilizar a chuva prevista pelo modelo global, e a previsão deste exemplo se estende até o dia 31 de março. No dia 30 de setembro de 1998 também é realizada, para esse exemplo, a última atualização das vazões dos rios e do armazenamento do aquífero com base nas vazões observadas nos diversos postos fluviométricos. Esse procedimento é repetido para cada um dos membros do conjunto de previsões do modelo global, resultando em cinco hidrogramas diferentes de previsão no período, como mostra a Figura 8.1.

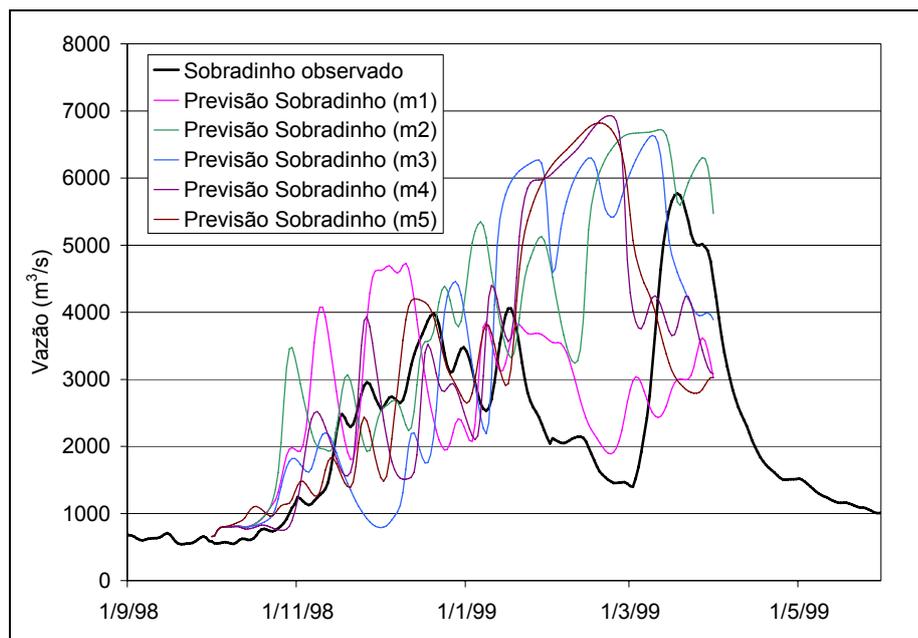


Figura 8.1: Exemplo de previsão de vazão natural em Sobradinho com horizonte de 6 meses, iniciada no dia 1 de outubro de 1998 e estendendo-se até o dia 31 de março de 1999. As linhas coloridas apresentam as previsões obtidas com cada um dos 5 membros do modelo global e a linha preta apresenta as vazões observadas.

Observa-se na Figura 8.1 que as previsões iniciadas no dia 1 de outubro rapidamente se afastam dos valores observados. Durante os meses de verão são previstos valores mais altos de vazão, da mesma ordem de grandeza das vazões observadas, entretanto sem concordância no tempo, o que é esperado em função da grande antecedência das previsões. Para comparar as previsões com os valores observados normalmente é calculada a média das vazões calculadas a partir de cada membro do conjunto.

Na Figura 8.2 é apresentada a média dos cinco membros apresentados na Figura 8.1 comparada com as vazões observadas. No exemplo da Figura 8.2 a vazão prevista é bastante próxima da vazão observada nos quatro primeiros meses (outubro a janeiro) da previsão, porém não captou a forte queda das vazões durante o mês de fevereiro e o grande pico do período, ocorrido em março. Na Figura 8.2 também é apresentada uma previsão utilizando a chuva observada, que pode ser considerada a previsão com chuva prevista perfeita. Nota-se que, utilizando a chuva observada, o modelo se mantém bastante próximo do valores observados de vazão, mesmo nas maiores antecedência. Observa-se ainda que, existe uma superestimativa sistemática em todo o período. Isso provavelmente se deve a erros do ajuste do modelo hidrológico, que podem ser ocasionados por problemas como aumentos nos usos consuntivos, redução ou aumento de postos pluviométricos, dentre outros.

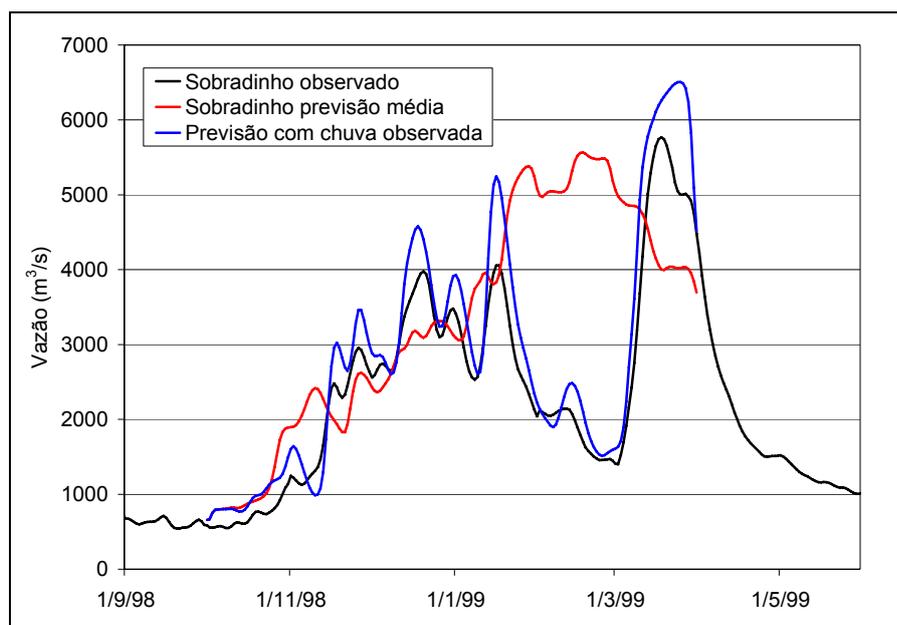


Figura 8.2: Exemplo de previsão (média do conjunto de 5 membros) com horizonte de 6 meses, iniciada no dia 1 de outubro de 1998 e estendendo-se até o dia 31 de março de 1999.

Na Figura 8.2 é apresentada a previsão de vazão na forma em que seria utilizada operacionalmente, entretanto essa forma dificulta a avaliação da qualidade das previsões. Para a comparação entre as previsões é mais interessante organizar os resultados como hidrogramas previstos com antecedência constante. Na Figura 8.3a é apresentado um exemplo de vazões mensais previstas com 1 mês de antecedência em Sobradinho e na Figura 8.3b é apresentado um exemplo de vazões mensais previstas com 6 meses de antecedência. Observa-se que a incerteza da previsão é muito maior na Figura 8.3b do que na Figura 8.3a, devido redução da influência das condições iniciais e ao acúmulo dos erros nas antecedências menores que 6 meses.

8.1.1 Resultados em Três Marias

Três Marias é o primeiro aproveitamento hidrelétrico ao longo do rio São Francisco considerado neste trabalho. A bacia hidrográfica até o local do barramento de Três Marias tem uma área de 50.784 km^2 , o que é relativamente pouco quando comparada à área coberta por uma única célula do modelo climático global, que tem cerca de $200 \times 200 \text{ km}$, conforme se observa na Figura 8.4.

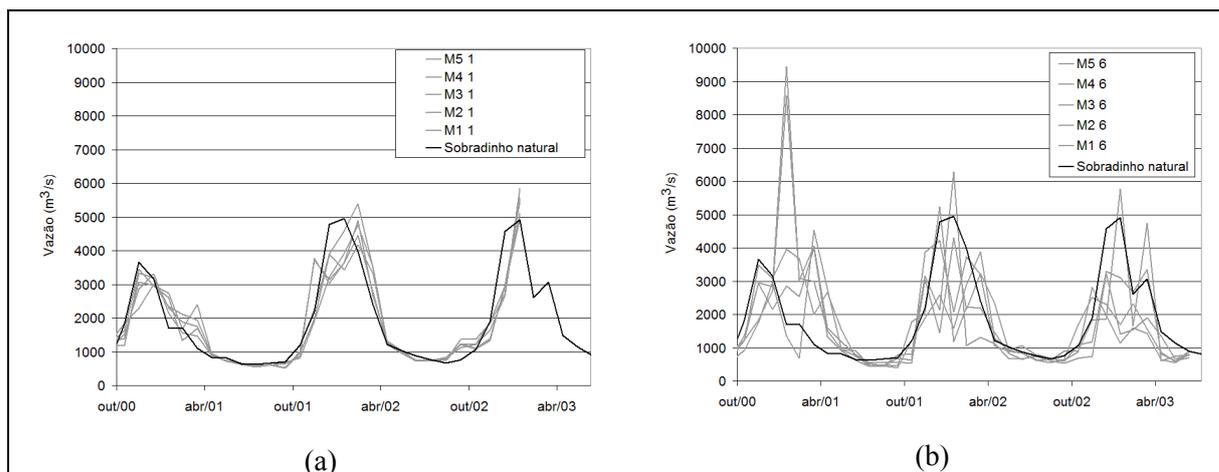


Figura 8.3: Hidrogramas de previsão de vazão mensal com antecedência constante de (a) 1 mês e de (b) 6 meses.

Inicialmente foram realizadas previsões de vazão baseadas na chuva observada que, obviamente, não poderiam ser obtidas operacionalmente, mas, entretanto, são importantes como base para comparação da qualidade das outras previsões, uma vez que podem ser entendidas como previsões de vazão obtidas a partir de previsões perfeitas de chuva.

Outra referência importante para comparação são as vazões médias naturais de longo termo (MLT), que constituem o mais simples modelo de previsão disponível. Espera-se que qualquer método de previsão seja, no mínimo, melhor do que essa estimativa. Além disso, os valores da MLT permitem avaliar se a vazão natural observada foi maior ou menor do que a média num período específico.

Na Figura 8.5 são apresentadas previsões de vazão natural para a usina de Três Marias, nas antecedências de 1 e 6 meses, utilizando chuva observada. Essas previsões são comparadas com a vazão natural e com a MLT das vazões naturais para cada mês. Inicialmente, observa-se que as vazões naturais no período de previsão (1997 a 2003) foram relativamente baixas, pois embora tenham ocorrido alguns meses com vazão acima da MLT durante o período do verão, durante os meses de inverno a vazão foi sempre igual ou inferior a média. Além disto, o período úmido de 2000/2001 apresentou vazões excepcionalmente baixas quando comparadas com a MLT.

Em relação as previsões com chuva observada, na Figura 8.5 se nota que o modelo representa muito bem os valores observados, mas apresenta uma tendência de superestimativa em todo o período. Estes erros são de maior magnitude nos períodos de estiagem, principalmente a partir do ano de 1999. Para a antecedência de 6 meses (Figura 8.5b) a

superestimativa é maior, mas mantém uma boa representação dos hidrogramas e mostram um caráter sistemático, uma vez que estão sempre acima dos valores observados.

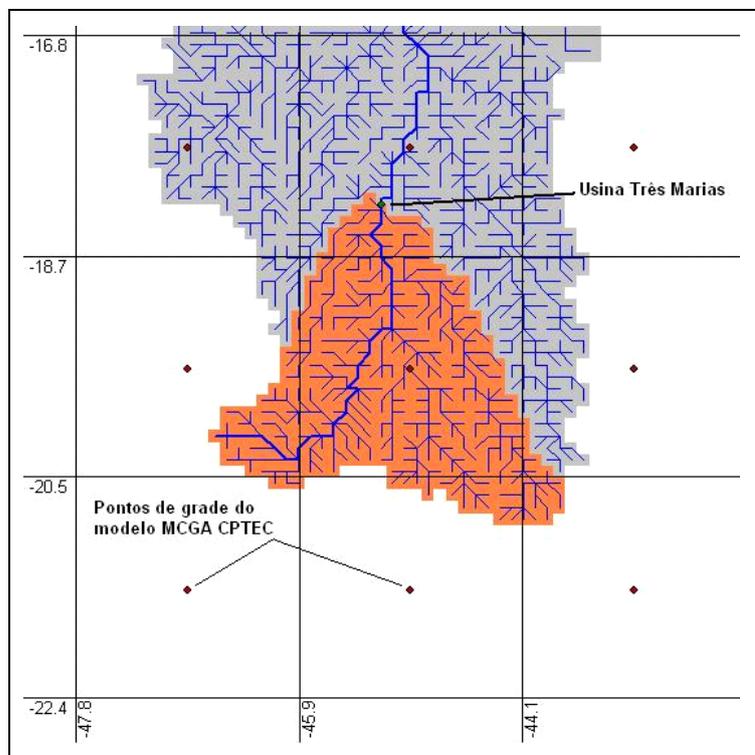


Figura 8.4: Comparação da área de drenagem do rio São Francisco até Três Marias e da resolução do modelo climático global.

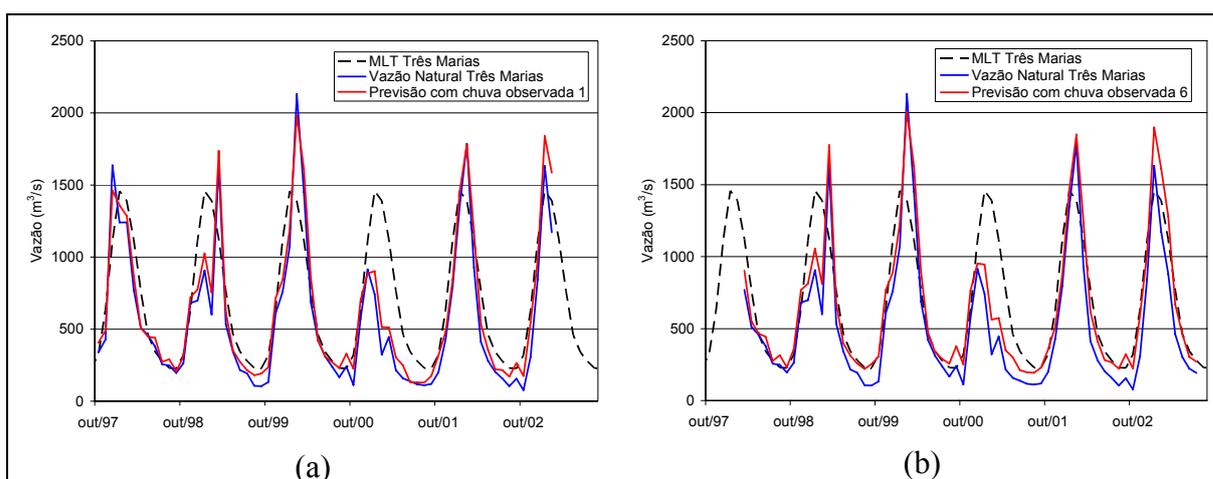


Figura 8.5: Previsão de vazões para a usina de Três Marias utilizando chuva observada, com antecedências de 1 e 6 meses.

Essa tendência do modelo hidrológico, em superestimar as vazões naturais em Três Marias, já havia sido observada durante a fase de ajuste do modelo (Capítulo 6). Portanto, uma grande parcela destes erros está relacionada com a calibração do modelo MGB-IPH, uma vez que podem ter ocorrido mudanças nos usos consuntivos da água e/ou diferenças de pluviosidade. Outro motivo são as possíveis inconsistências nas vazões naturais, destacadas no item 6.7.2, que podem ter sido ampliadas.

Conforme descrito no item 8.1, as previsões climáticas do modelo AGCM do CPTEC foram usadas como entrada para o modelo hidrológico e os resultados para as antecedências constantes de 1 a 6 meses são apresentados na Figura 8.6. Nesta figura é mostrada a faixa de valores máximos e mínimos estimados pelo conjunto de cinco previsões (faixa cinza) e a média dos cinco valores (linha preta mais grossa), comparados com as vazões naturais “observadas” (linha azul).

Os gráficos da Figura 8.6 mostram que, até com 1 mês de antecedência (Figura 8.6a), a faixa de valores previstos apresenta grande amplitude nos períodos chuvosos. Mas, mesmo com esse comportamento, em diversos momentos os valores observados se situam fora dos limites previstos, para todas as antecedências. De maneira geral a amplitude da faixa de valores previstos aumenta com o crescimento da antecedência, principalmente a partir de três meses (Figura 8.6c).

Para os períodos de estiagem as previsões possuem maior concordância, reduzindo a amplitude da faixa de valores previstos, mas isso está dentro do comportamento esperado devido a reduzida quantidade de chuvas na bacia. Além disso, da mesma forma que nas previsões com chuva observada (Figura 8.5), nota-se que a partir de 1999 as vazões de estiagem são sempre superestimadas, em virtude das diferenças detectadas no ajuste no modelo hidrológico, já citadas.

Analisando previsão média dos cinco membros, se observa que o modelo não apresenta tendências definidas de sub ou superestimativa durante os períodos chuvosos, que são os meses onde a previsão tem maior importância. Para um mês de antecedência (Figura 8.6a), observa-se que as vazões extraordinariamente baixas do verão de 2000/2001 foram muito bem previstas. Entretanto, no período de verão de 1999/2000 e 2001/2002, quando as vazões foram mais altas do que a média, as previsões subestimaram bastante as vazões, especialmente em fevereiro de 2000. A subestimativa para estes dois anos se mantém para todas as antecedências.

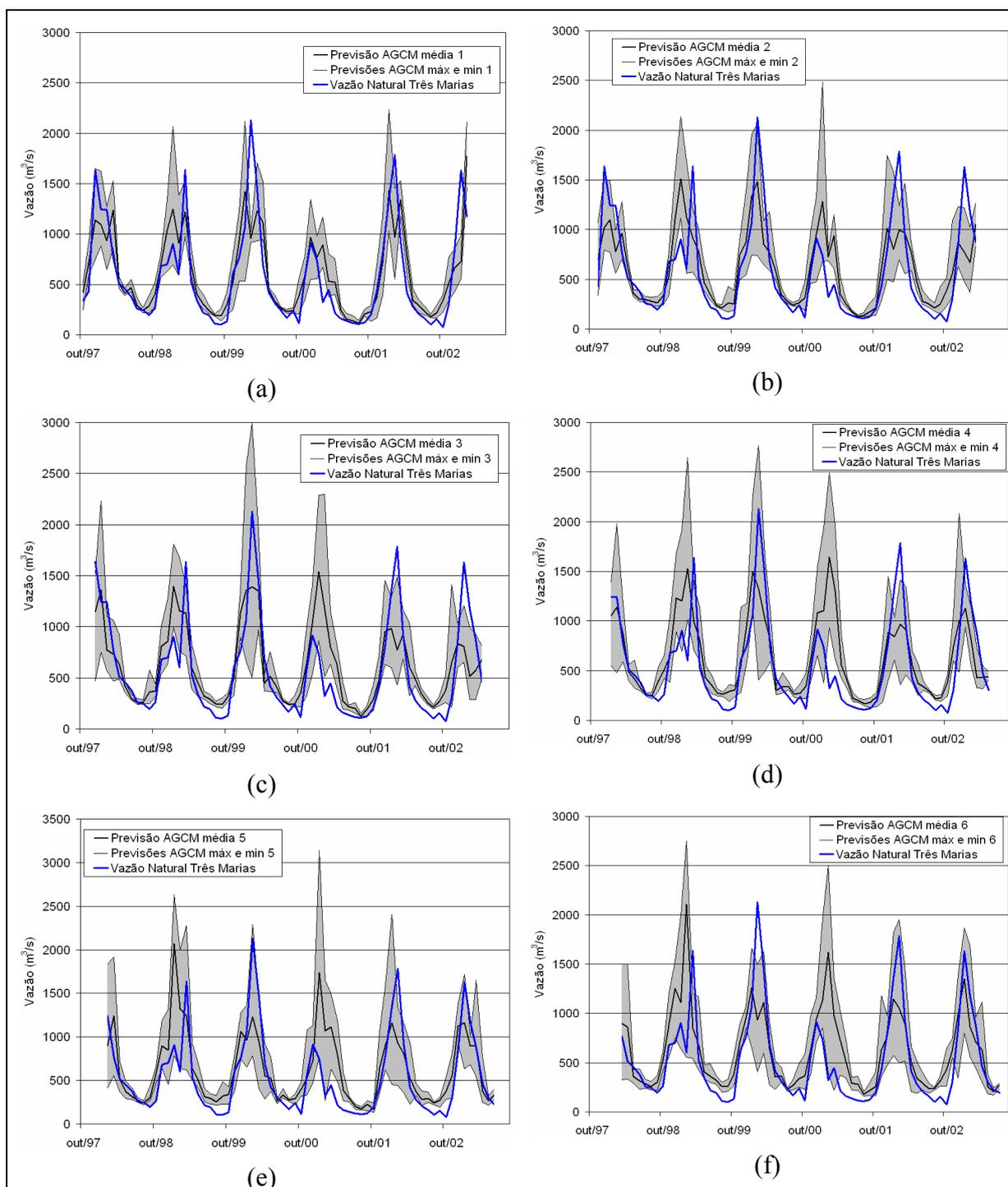


Figura 8.6: Previsões de vazão natural em Três Marias para antecedências constantes de 1 a 6 meses. A linha azul é a vazão natural; a faixa cinza representa os valores máximos e mínimos previstos com base nos 5 membros do modelo AGCM e a linha preta mais grossa é a média dos 5 membros.

Para dois meses de antecedência (Figura 8.6b) já se nota um decréscimo do ajuste em todo o período, destacando-se a forte subestimativa nos dois últimos verões (2001/2002 e 2002/2003). Com três meses de antecedência (Figura 8.6c) a dispersão entre os cinco membros e ampliada e o modelo superestima bastante o período úmido 200/2001. Para as demais antecedências (Figura 8.6d,e,f) o comportamento das previsões é bastante semelhante ao descrito para três meses, com exceção do aumento na superestimativa em 1998/1999.

Na Figura 8.7 são apresentadas as vazões previstas em valores trimestrais (média dos 3 primeiros meses) e semestrais (média dos 6 meses). Nota-se que, embora as precipitações acumuladas de três e seis meses apresentem maior correlação dos que os valores mensais (Capítulo 7), as vazões trimestrais e semestrais (Figura 8.7) não mostram melhoras em relação às mensais (Figura 8.6).

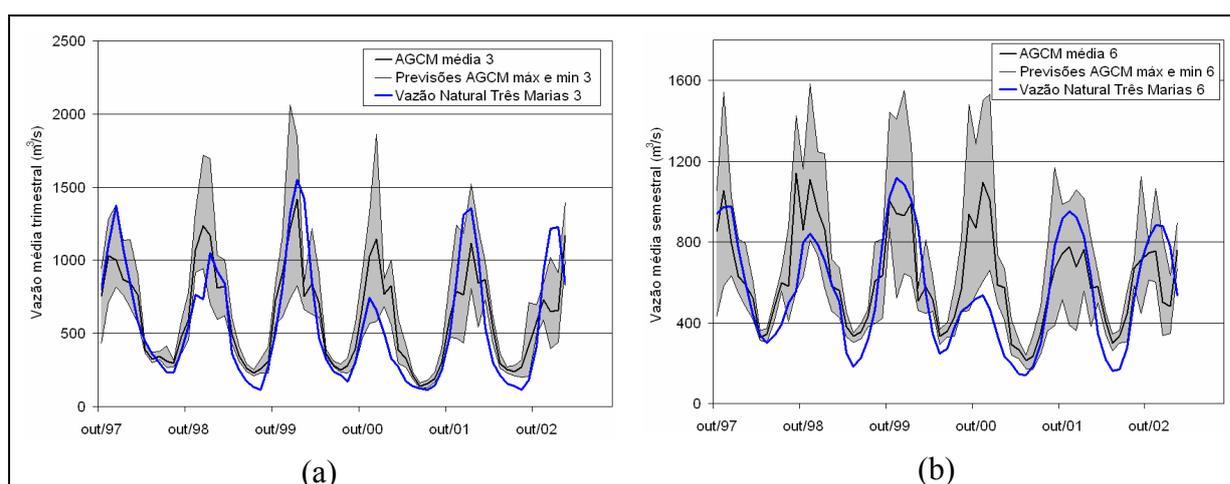


Figura 8.7: Previsões de vazões naturais (a) trimestrais e (b) semestrais em Três Marias. A linha azul é a vazão natural; a faixa cinza representa os valores máximos e mínimos previstos com base nos 5 membros do modelo AGCM e a linha preta mais grossa é a média dos 5 membros.

Para os valores trimestrais (Figura 8.7a) o modelo apresenta os mesmos problemas de superestimativa das vazões de estiagem. Nos períodos chuvosos houve uma boa representação do verão de 1999/2000 (período acima da média), mas superestima o verão de 2000/2001. A maioria dos demais anos foram subestimados. Nas vazões semestrais (Figura 8.7b) as diferenças entre valores previstos e calculados são bastante significativas para quase todos os anos. Acentuam-se demasiadamente as superestimativas das estiagens e do período chuvoso de 2000/2001.

Previsões de vazão com previsão climática redistribuída

Conforme descrito no capítulo anterior, a previsão climática média dos cinco membros gerados pelo modelo AGCM do CPTEC foi redistribuída em valores diários, utilizando eventos ocorridos no passado. Foram testadas duas formas de redistribuição: i) considerou-se somente o valor semestral gerado pelo modelo AGCM sobre a bacia até Sobradinho e buscou-se cinco semestres com valores similares no histórico; ii) o mesmo do primeiro modelo, porém considerando a fase do SOI na escolha dos semestres do histórico. Os resultados da redistribuição da chuva mostraram que o modelo que considera a fase do SOI apresentou vantagens de redução dos erros médios da chuva prevista.

A previsões com valores redistribuídos foram usados como entrada no modelo hidrológico para geração das vazões. Na Figura 8.8 são apresentados os resultados para as antecedências de 1 e 6 meses, e na Figura 8.9 as previsão das vazões trimestrais e semestrais. Os gráficos com as vazões redistribuídas referem-se à média do conjunto de cinco semestres selecionados do histórico.

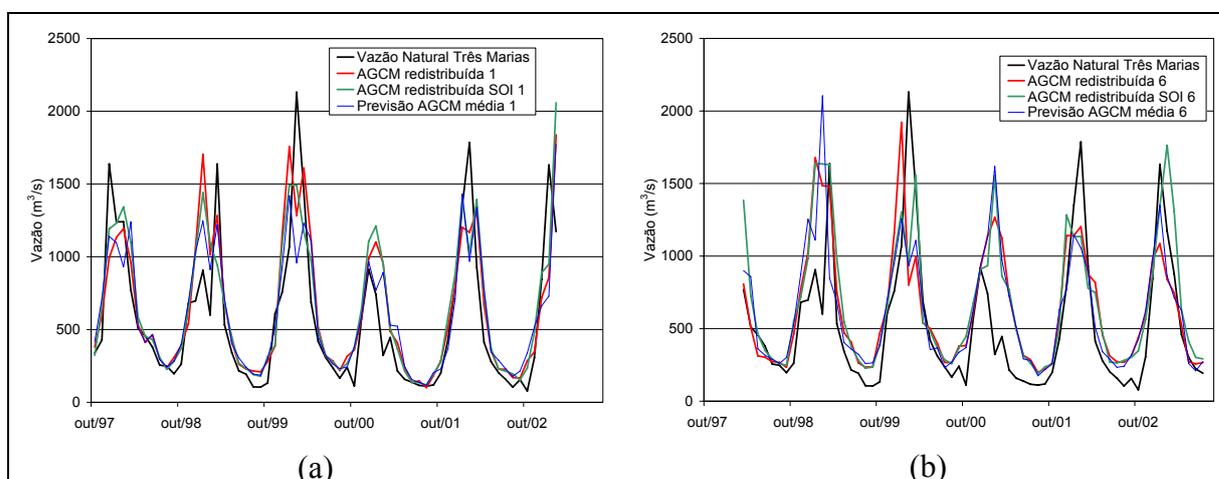


Figura 8.8: Previsões de vazão para Três Marias com base na previsão do modelo AGCM sem e com redistribuição dos valores diários, para 1 e 6 meses de antecedência.

Nas duas figuras se observa que os as previsões em Três Marias, com redistribuição dos valores diários, não apresentou qualquer melhora significativa. Nota-se que os erros de quantidade são demasiadamente elevados, o que torna muito pouco significativos os erros de distribuição espacial e temporal dos valores diários. Embora a consideração das fases do SOI tenha melhorado as previsões para os dois últimos períodos chuvosos (2001/2002 e

2002/2003), em termos semestrais (Figura 8.9), os erros em 2000/2001 continuam sendo muito grandes.

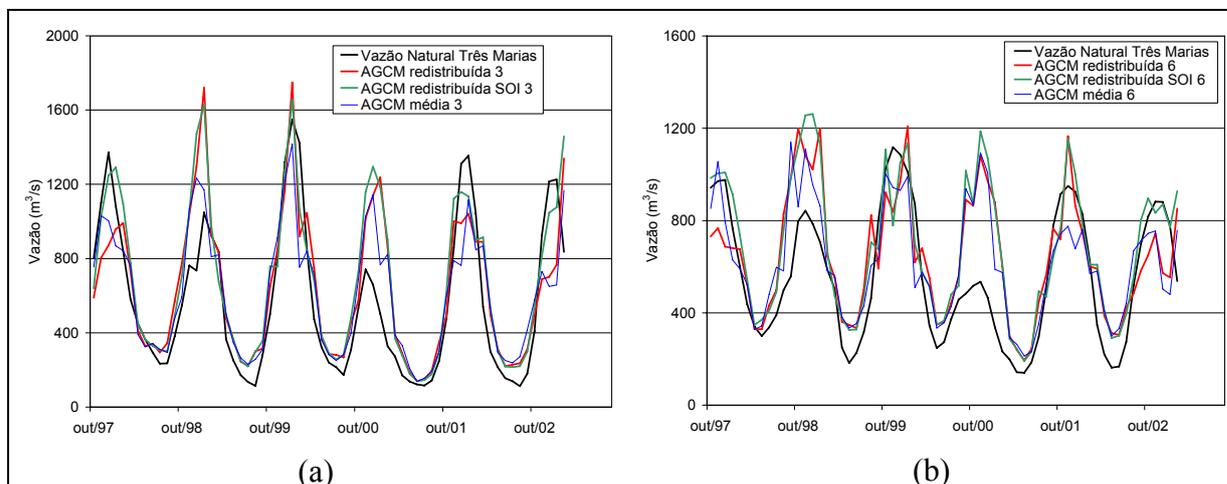


Figura 8.9: Previsões de vazão para Três Marias com base na previsão do modelo AGCM sem e com redistribuição dos valores diários. Valores médios trimestrais e semestrais.

Comparações com as previsões do ONS

As previsões obtidas com o modelo hidrológico a partir das chuvas previstas pelo modelo climático global foram comparadas às previsões de vazão obtidas com a metodologia atualmente empregada no ONS. No caso das previsões com 6 meses de antecedência o modelo utilizado no ONS é denominado PREVIVAZM, que utiliza diferentes combinações de modelos estocásticos.

As previsões mensais com antecedência de até 6 meses, realizadas com o modelo PREVIVAZM, foram executadas por técnicos da ANEEL sob a orientação do ONS, utilizando a versão 1.3 (Interface v. 1.02) do referido modelo, encaminhado pelo CEPEL e os arquivos de entrada disponibilizados pelo ONS.

Na Figura 8.10 são apresentadas as previsões do modelo global (média dos 5 membros) para a usina Três Marias, juntamente com os resultados do modelo PREVIVAZM, para as antecedências constantes de 1 a 6 meses. Nos gráficos dessa figura se observa que modelo estocástico PREVIVAZM prevê razoavelmente bem as vazões com 1 mês de antecedência (Figura 8.10a), mas a partir de 4 meses de antecedência (Figura 8.10d) a previsão estocástica é praticamente idêntica à vazão média de longo termo, o que é esperado,

uma vez que as vazões afluentes a Três Marias não apresentam autocorrelação significativa por um período tão longo de tempo, isso é, a memória da bacia é relativamente curta.

Comparando as previsões dos modelos observa-se que são mais ou menos equivalentes para um mês de antecedência. Para 6 meses de antecedência a previsão do modelo estocástico PREVIVAZM degrada para a MLT, o que piora bastante os resultados. Já as previsões baseadas na chuva prevista pelo modelo AGCM não tendem a se aproximar da MLT, porém não apresentam resultados muito melhores. Com base nestas figuras pode-se dizer que em Três Marias as previsões com a metodologia baseada nas previsões climáticas de precipitação do modelo AGCM do CPTEC não apresentam vantagens em relação às previsões obtidas com o modelo estocástico PREVIVAZM, atualmente utilizado no ONS.

Além da avaliação visual, para avaliação da qualidade das previsões são usados os erros médios medidos pelo *RMSE* (Equação 7.1) e uma estimativa adicional do benefício da previsão, denominada análise de redução da variância (*RV*) proporcionada pelo método (Equação 8.1).

$$RV = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{prev} - Q_{nat})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{med} - Q_{nat})^2} \quad (8.1)$$

onde: n é o número de meses; Q_{med} é a vazão estimada com base nas médias mensais; Q_{prev} é a vazão calculada pelo método alternativo (climático, empírico, estocástico, ...) e Q_{nat} a vazão natural.

O cálculo da variância proporciona uma medida eficiente da dispersão dos valores previstos e complementa a análise dos erros médios. Desta forma, para avaliação do modelo de previsão deve-se considerar não somente a média dos membros, mas também se o mesmo é capaz de reduzir a dispersão das previsões em relação a uma determinada metodologia.

Nesse trabalho, a redução da variância dos métodos de previsão é calculada em relação ao modelo das médias históricas (MLT), que constitui a técnica mais simples de previsão utilizada. Dessa forma, a redução da variância é dada pela Equação 8.1.

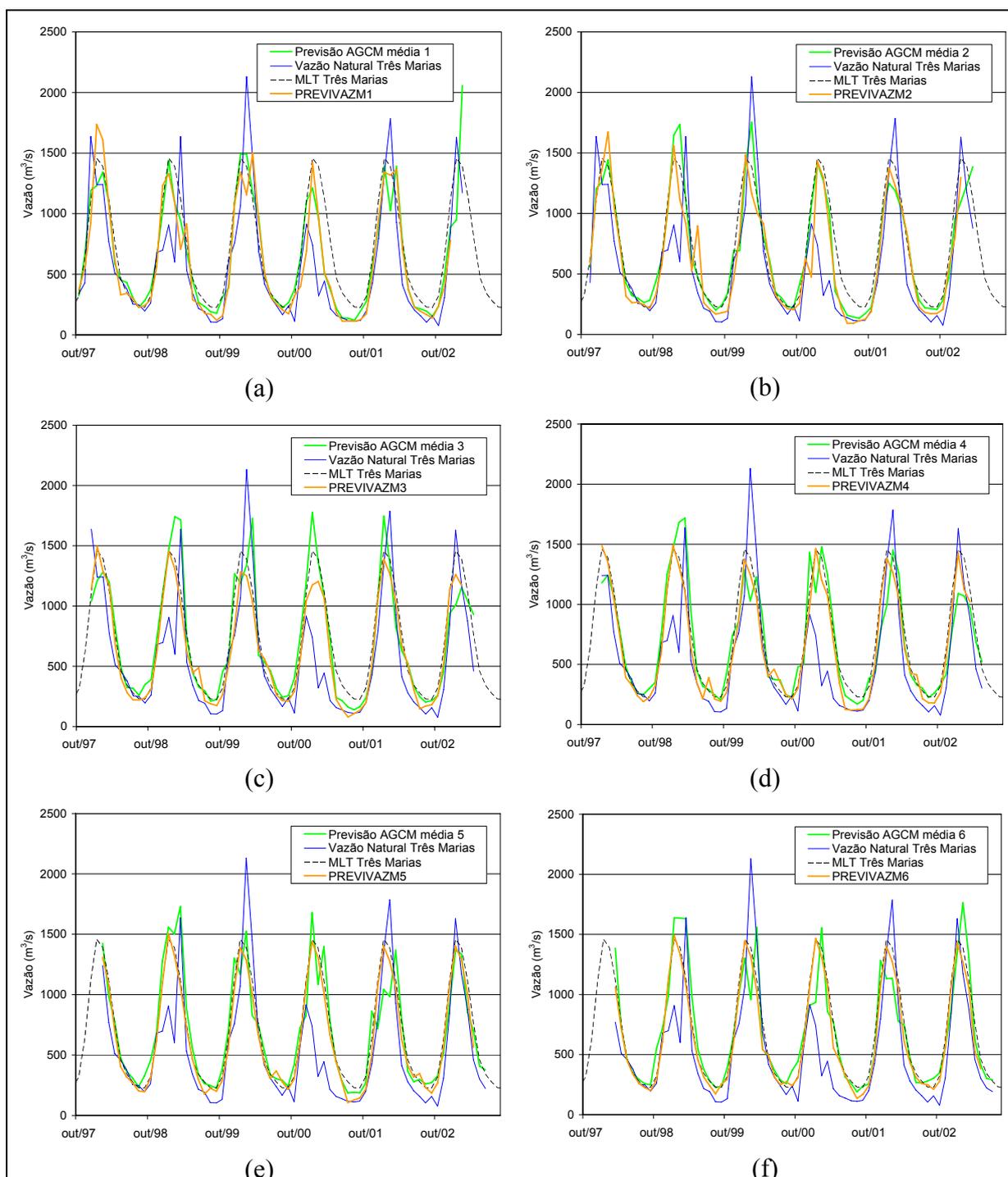


Figura 8.10: Previsões de vazão natural em Três Marias com de antecedências de 1 a 6 meses. A linha azul é a vazão natural; a linha verde é a vazão prevista com base no modelo global redistribuída com as fases do SOI; a linha laranja é a previsão do modelo PREVIVAZM; a linha tracejada é a vazão natural média de longo termo.

O valor de RV é igual a 1 (ou 100%) se todas as vazões previstas (Q_{prev}) forem iguais às observadas (previsão perfeita); maior do que zero se as previsões com base no método

alternativo forem melhores do que as previsões com base nas médias históricas e menor do que zero no caso inverso.

Na Figura 8.11 são apresentados os resultados dos coeficientes de avaliação (*RMSE* e *RV*) das previsões de vazão natural em Três Marias. Observa-se que os valores de *RMSE* são bastante elevados tanto para o modelo hidroclimático como para o PREVIVAZM (Figura 8.11a). Os erros do modelo PREVIVAZM são apenas ligeiramente melhores do que a MLT, em todas as antecedências. No caso do modelo hidroclimático os erros são maiores do que a MLT para as antecedências a partir de 3 meses.

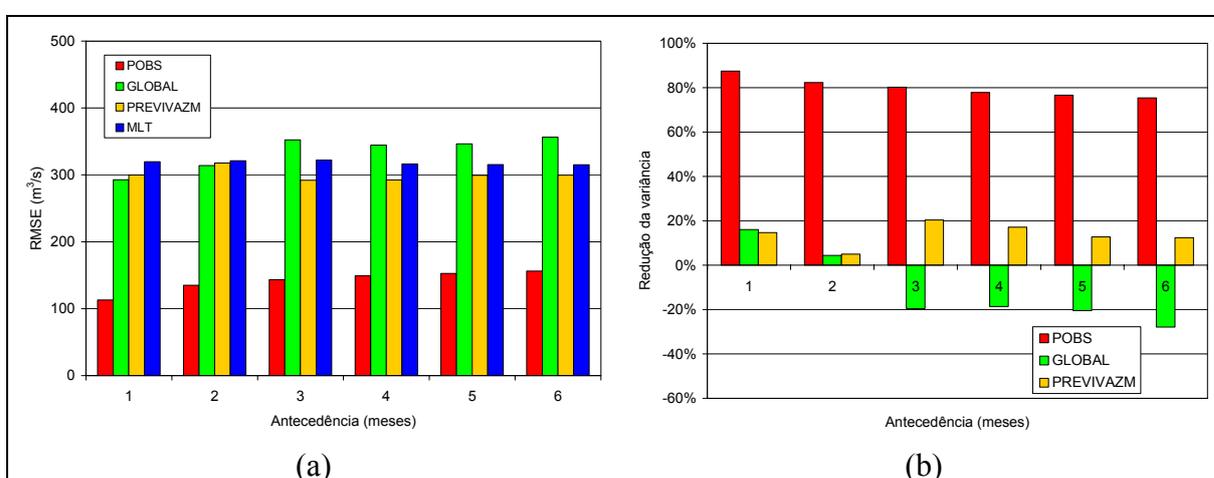


Figura 8.11: *RMSE* e Redução da Variância (*RV*), em relação a MLT, das previsões de vazão natural em Três Marias, antecedências de 1 a 6 meses (verde: vazão prevista com base no modelo AGCM; laranja: previsão do modelo PREVIVAZM; azul: previsão baseada na vazão natural média de longo termo; vermelho: previsão de vazão baseada na chuva observada).

Nota-se que o *RMSE* do modelo hidroclimático é relativamente elevado quando se utilizam precipitações observadas, devido aos erros sistemáticos do modelo hidrológico. É importante ressaltar que estes erros podem ser reduzidos, por meio de uma revisão do ajuste no modelo hidrológico ou através de um modelo de regressão linear, ou estocástico, que estime os erros da previsão.

Em termos de redução da variância (Figura 8.11b), os resultados mostram que o modelo estocástico é sempre melhor do que a MLT, pois os valores de *RV* são positivos para todas as antecedências, embora sejam reduzidos. Para os modelos hidroclimático os valores de *RV* são positivos, e reduzidos, para somente 1 e 2 meses de antecedência. Nos demais

horizontes RV é negativa, indicando que os resultados do modelo hidroclimático são piores do que o simples uso da MLT.

8.1.2 Resultados em Sobradinho

Sobradinho é um dos aproveitamentos hidrelétricos mais importantes da bacia, principalmente por sua capacidade de regularização das vazões. Na Figura 8.12 é apresentada a bacia hidrográfica até o local da barragem de Sobradinho, que possui uma área de 503.937 km² e pode ser vista comparada à resolução espacial do modelo climático global, de 200 x 200 km.

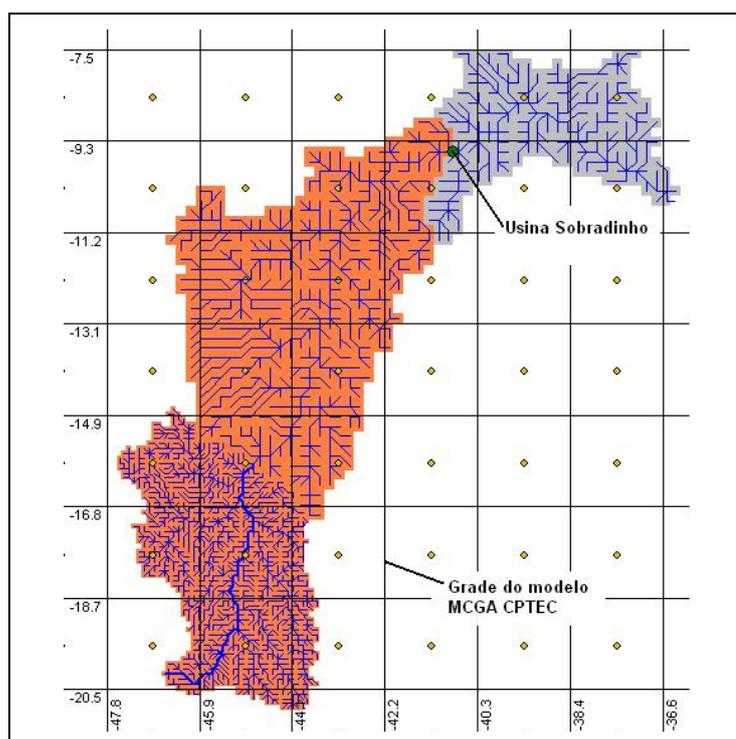


Figura 8.12: Comparação da área de drenagem do rio São Francisco até Sobradinho e da resolução do modelo climático global.

Assim como em Três Marias, as vazões naturais de Sobradinho foram inicialmente comparadas com a MLT e com as previsões de vazão usando chuva observada. Estas são as duas referências principais para comparação do modelo de previsão hidroclimática, uma vez que a MLT é o modelo mais simples de ser usado e a previsão com chuva observada é a

melhor previsão possível de ser obtida com essa metodologia, embora seja impossível de ser realizada operacionalmente.

Na Figura 8.13 são apresentadas previsões de vazão natural para a usina de Sobradinhos, nas antecedências de 1 e 6 meses, utilizando chuva observada. Essas previsões são comparadas com a vazão natural e com a MLT das vazões naturais para cada mês. Inicialmente, observa-se que as vazões naturais no período de previsão (1997 a 2003) foram baixas, pois durante os meses de verão a vazão foi sempre igual ou inferior a média. Além disto, os períodos úmidos de 1997/1998 e 2000/2001 apresentaram vazões excepcionalmente baixas quando comparadas com a MLT.

Em relação as previsões com chuva observada, na Figura 8.13 se nota que o modelo representa muito bem os valores observados e, diferentemente de Três Marias, não apresenta tendências de sub ou superestimativa. Entretanto, ressalva-se que permanecem as retiradas constantes de 250 m³/s em Morpará e Sobradinho em todas as previsões do modelo hidroclimático.

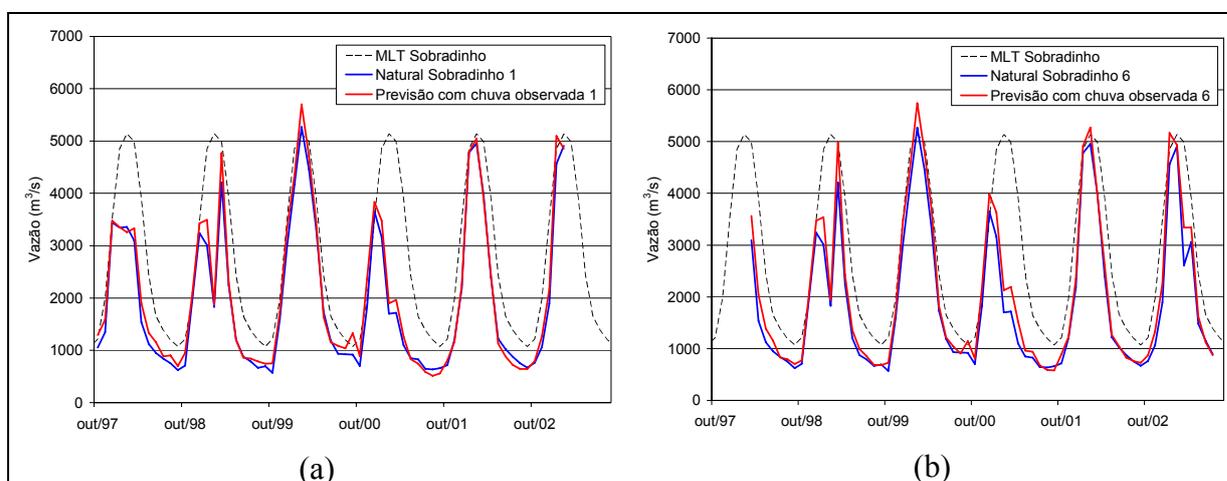


Figura 8.13: Previsão de vazões para a usina de Sobradinho utilizando chuva observada, com antecedências de 1 e 6 meses.

Os resultados das previsões de vazão natural em Sobradinho com base no modelo AGCM do CPTEC, para as antecedências constantes de 1 a 6 meses, são apresentados na Figura 8.14. Nesta figura é mostrada a faixa de valores máximos e mínimos estimados pelo conjunto de cinco previsões (faixa cinza) e a média dos cinco valores (linha preta mais grossa), comparados com as vazões naturais (linha azul).

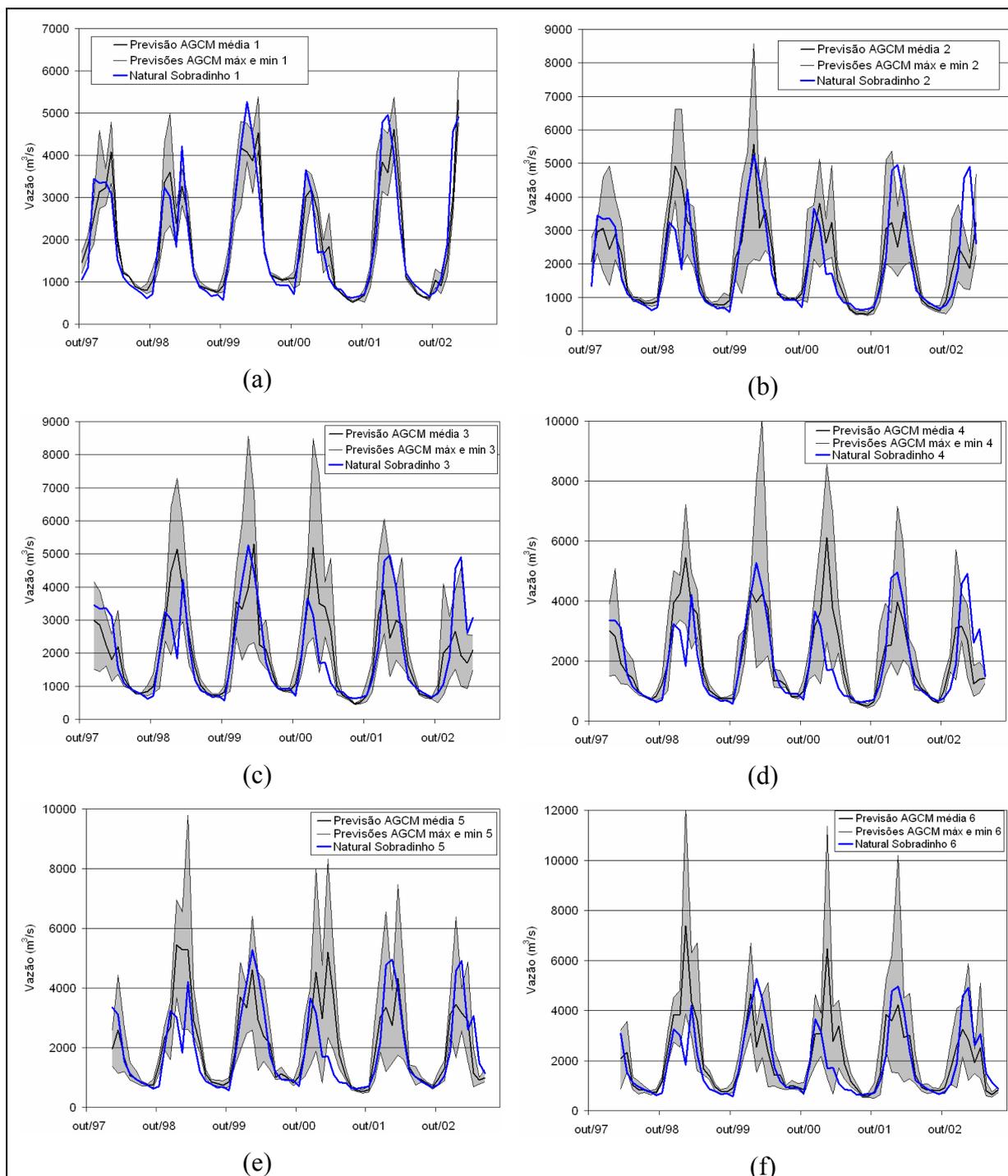


Figura 8.14: Previsões de vazão natural em Sobradinho para antecedências constantes de 1 a 6 meses. A linha azul é a vazão natural; a faixa cinza representa os valores máximos e mínimos previstos com base nos 5 membros do modelo AGCM e a linha preta mais grossa é a média dos 5 membros.

Os gráficos da Figura 8.14 mostram que, assim como em Três Marias, a faixa de valores previstos apresenta grande amplitude nos períodos chuvosos. A única exceção são as

previsões com 1 mês de antecedência (Figura 8.14a). E mesmo com esse comportamento, em diversos momentos os valores observados se situam fora dos limites previstos, para todas as antecedências. De maneira geral a amplitude da faixa de valores previstos aumenta com o crescimento da antecedência, principalmente a partir de dois meses (Figura 8.14b).

Para os períodos de estiagem as previsões possuem maior concordância, reduzindo a amplitude da faixa de valores previstos, mas isso está dentro do comportamento esperado devido a reduzida quantidade de chuva na bacia. Nota-se que as retiradas constantes de 250 m³/s tem um efeito muito importante nas vazões de estiagem, uma vez que o modelo prevê muito bem para estes períodos, mesmo nas maiores antecedências.

Avaliando-se a média dos cinco membros previstos observa-se que, com antecedência de apenas 1 mês (Figura 8.14a) as previsões estão sempre muito próximas da vazão natural, o que se deve à memória de alguns dos principais rios e ao longo tempo de propagação das vazões ao longo do rio São Francisco. Assim, as primeiras duas semanas são razoavelmente bem previstas mesmo que a previsão de chuva seja ruim, e isso influencia fortemente o resultado avaliado no primeiro mês.

Para dois meses de antecedência (Figura 8.14b) já se nota um decréscimo do ajuste em todo o período, destacando-se a forte subestimativa nos dois últimos verões (2001/2002 e 2002/2003). Com três meses de antecedência (Figura 8.14c) a dispersão entre os cinco membros é ampliada e o modelo superestima bastante o período úmido 2000/2001. Para as demais antecedências (Figura 8.14d,e,f) o comportamento das previsões é bastante semelhante ao descrito para três meses, mas sempre reduzindo a qualidade.

Na Figura 8.15 são apresentadas as vazões previstas em valores trimestrais (média dos 3 primeiros meses) e semestrais (média dos 6 meses). Nota-se que, embora as precipitações acumuladas de três e seis meses apresentem maior correlação dos que os valores mensais (Capítulo 7), as vazões trimestrais e semestrais (Figura 8.15) não mostram melhoras em relação as mensais (Figura 8.14).

Infelizmente, no período analisado não foi registrado um único ano com vazões acima da média, o que introduz uma tendência nos dados e impede conclusões mais definitivas sobre a qualidade das previsões de vazão utilizando a metodologia proposta, baseada nas chuvas previstas pelo modelo global do CPTEC.

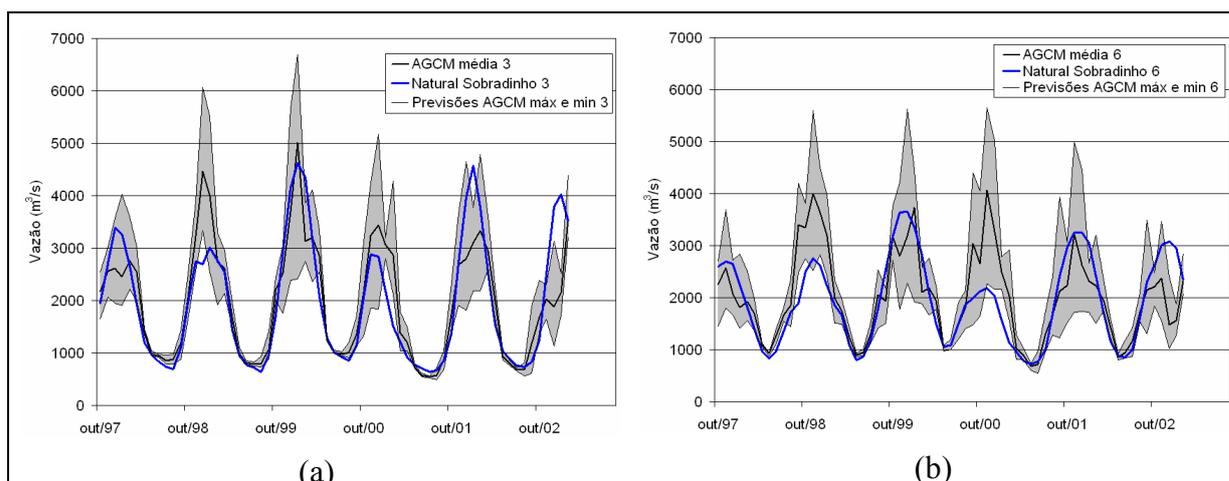


Figura 8.15: Previsões de vazões naturais (a) trimestrais e (b) semestrais em Sobradinho. A linha azul é a vazão natural; a faixa cinza representa os valores máximos e mínimos previstos com base nos 5 membros do modelo AGCM e a linha preta mais grossa é a média dos 5 membros.

Previsões de vazão com previsão climática redistribuída

A previsão com valores redistribuídos foram usados como entrada no modelo hidrológico para geração das vazões naturais em Sobradinho. Na Figura 8.16 são apresentados os resultados para as antecedências de 1 e 6 meses, e na Figura 8.17 as previsões das vazões trimestrais e semestrais. Os gráficos com as vazões redistribuídas referem-se a média do conjunto de cinco semestres selecionados do histórico.

Assim como em Três Marias, se observa que as previsões em Sobradinho, com redistribuição dos valores diários, não apresentou qualquer melhora significativa. Nota-se que os erros de quantidade são demasiadamente elevados, o que torna muito pouco significativos os erros de distribuição espacial e temporal dos valores diários. Embora a consideração das fases do SOI tenha melhorado as previsões para os dois últimos períodos chuvosos (2001/2002 e 2002/2003), em termos semestrais (Figura 8.17), os erros em 2000/2001 continuam sendo muito grandes.

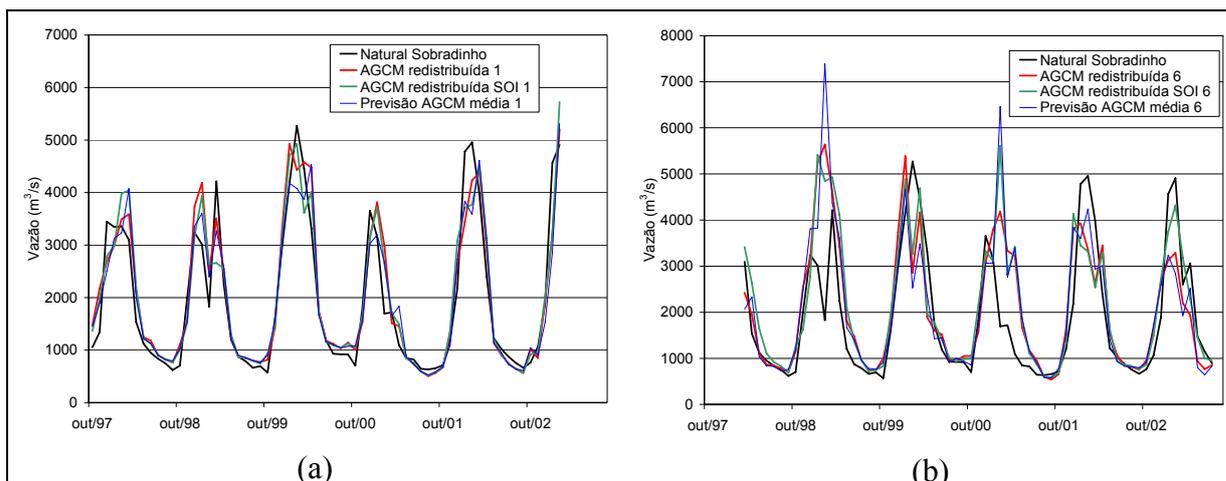


Figura 8.16: Previsões de vazão para Sobradinho com base na previsão do modelo AGCM sem e com redistribuição dos valores diários, para 1 e 6 meses de antecedência.

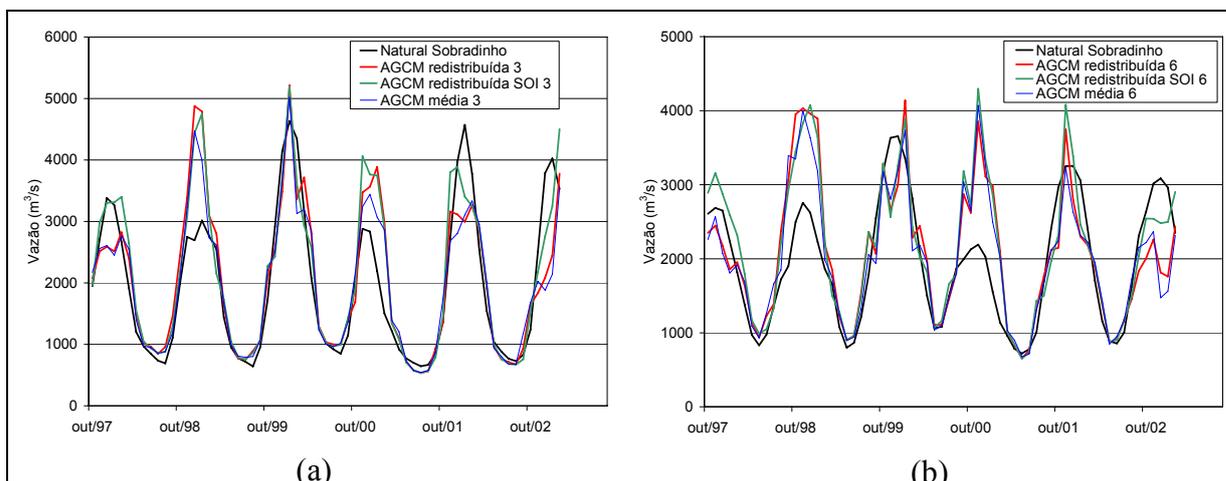


Figura 8.17: Previsões de vazão para Sobradinho com base na previsão do modelo AGCM sem e com redistribuição dos valores diários. Valores médios trimestrais e semestrais.

Comparações com as previsões do ONS

Na Figura 8.18 são apresentadas as previsões do modelo global (média dos 5 membros) para a usina de Sobradinho, juntamente com os resultados do modelo PREVIVAZM, para as antecedências constantes de 1 a 6 meses. Nos gráficos dessa figura se observa que modelo estocástico PREVIVAZM prevê razoavelmente bem as vazões com 1 mês de antecedência (Figura 8.18a), mas a partir de 2 meses de antecedência (Figura 8.18b) a previsão estocástica é praticamente idêntica à vazão média de longo termo, o que é esperado, uma vez que as vazões afluentes a Sobradinho apresentam autocorrelação significativa por um

período de aproximadamente um mês apenas, ou seja, a memória da bacia é inferior a dois meses.

Comparando as previsões dos modelos observa-se que são mais ou menos equivalentes para um mês de antecedência, embora o modelo hidroclimático tenha previsto melhor os anos com vazões muito abaixo da média (1997/1998 e 2000/2001). As previsões baseadas na chuva prevista pelo modelo AGCM não tendem a se aproximar da MLT, como ocorre com o PREVIVAZM, porém não apresentam resultados muito melhores. Com base nestas figuras pode-se dizer que também Sobradinho as previsões com a metodologia baseada nas previsões climáticas de precipitação do modelo AGCM do CPTEC não apresentam vantagens em relação às previsões obtidas com o modelo estocástico PREVIVAZM, atualmente utilizado no ONS.

Na Figura 8.19 são apresentados os resultados dos coeficientes de avaliação *RMSE* das previsões de vazão natural em Sobradinho, em valores mensais com antecedências de 1 a 6 meses (Figura 8.19a) e em valores médios mensais, bimestrais, ..., semestrais (Figura 8.19b). Nos valores mensais (Figura 8.19a), observa-se que os valores de *RMSE* são bastante elevados tanto para o modelo hidroclimático como para o PREVIVAZM. Os erros do modelo hidroclimático são menores do que os do PREVIVAZM somente nas antecedências de um e dois meses, sendo que somente com um mês a diferença é significativa, devido ao fato do modelo hidrológico representar melhor a memória da bacia. Nas antecedências de três a seis meses o modelo PREVIVAZM é melhor do que o hidroclimático, embora com pequenas diferenças.

Comparando-se as vazões médias mensais às semestrais (Figura 8.19b), o modelo hidroclimático tem melhor desempenho do que o PREVIVAZM em todos os horizontes. Entretanto, os erros ainda são elevados e as diferenças entre os dois modelos são pequenas para que sejam consideradas significativas. Nota-se que o *RMSE* do modelo hidroclimático usando chuva observada é bastante reduzido, mesmo para as maiores antecedências. Estes resultados indicam que a maior parcela dos erros do modelo hidroclimático, quando se usam as previsões do modelo AGCM, se deve aos erros na chuva prevista.

Além dos coeficientes *RMSE* e *RV* entre as diferentes previsões, em Sobradinho também foi usado o erro relativo médio (*EMR*) é a soma dos erros absolutos divididos pela vazão mensal natural observada em cada mês, dividida pelo número de meses analisados. Os resultados para o *EMR* e o *RV* são apresentados na Figura 8.20.

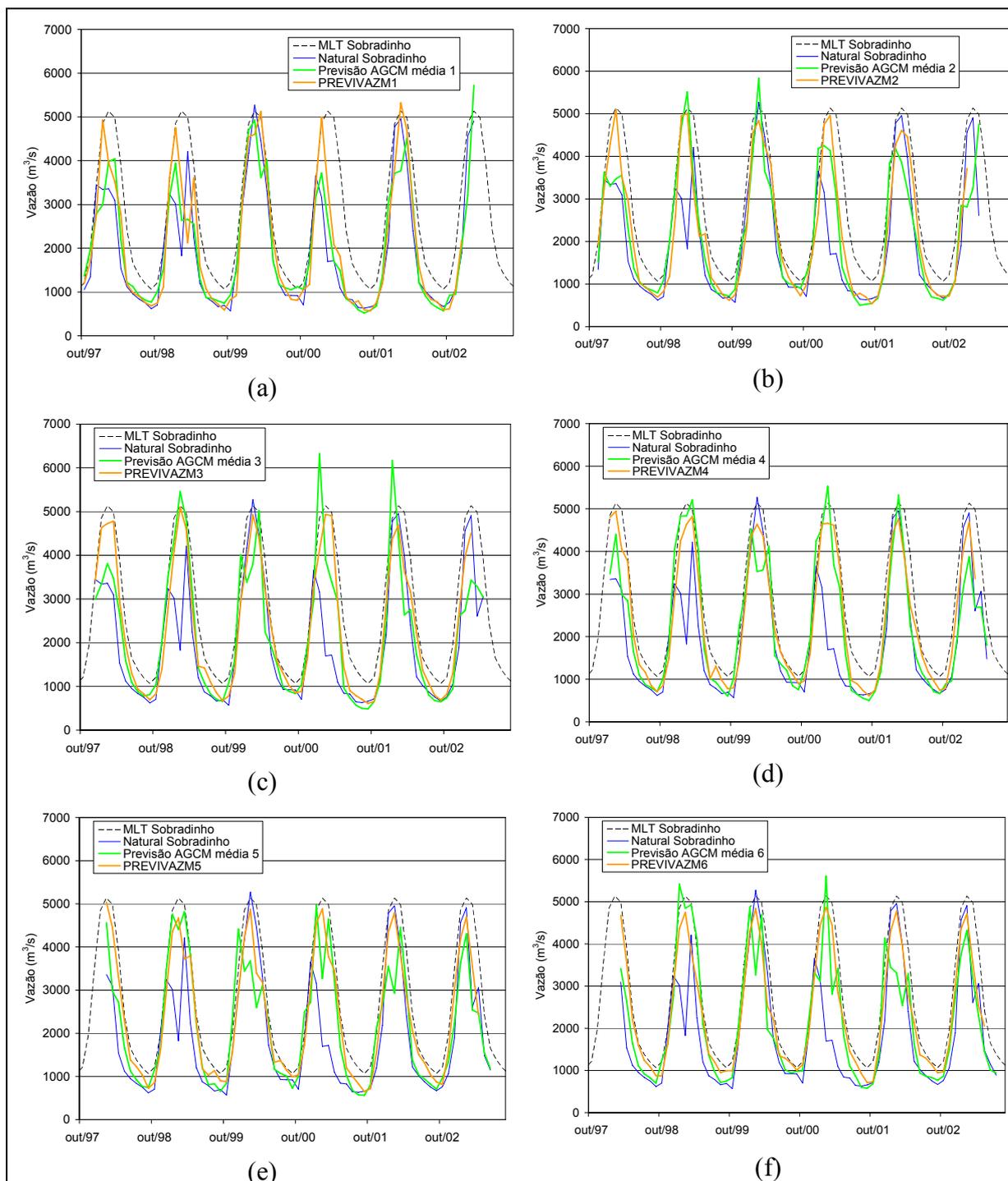


Figura 8.18: Previsões de vazão natural em Sobradinho com de antecedências de 1 a 6 meses. A linha azul é a vazão natural; a linha verde é a vazão prevista com base no modelo AGCM redistribuída com as fases do SOI; a linha laranja é a previsão do modelo PREVIVAZM; a linha tracejada é a vazão natural média de longo termo.

Na Figura 8.19a se observa que os valores do RMSE do modelo hidroclimático são piores entre três e seis meses. Mas, na Figura 8.20a se nota que o modelo hidroclimático

apresenta valores de *EMR* menores do que o PREVIVAZM em todas as antecedências. Isso indica que o modelo hidroclimático apresentou melhor desempenho na previsão das vazões do período de estiagem.

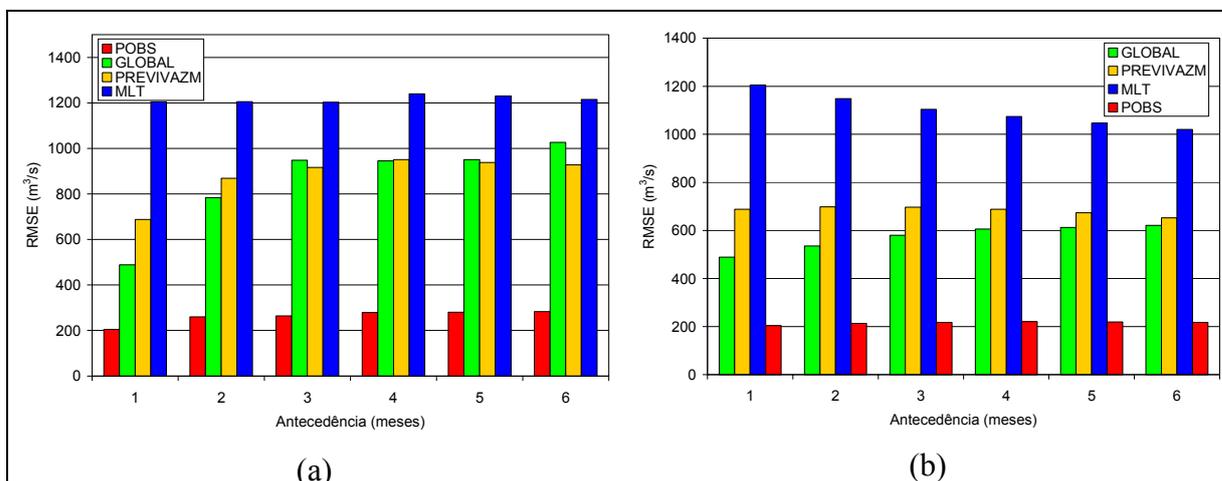


Figura 8.19: *RMSE* das previsões de vazão natural em Sobradinho: (a) previsões mensais com antecedências de 1 a 6 meses; (b) previsões de vazões médias de mensais, bimestrais, ..., semestrais (verde: vazão prevista com base no modelo AGCM; laranja: previsão do modelo PREVIVAZM; azul: previsão baseada na vazão natural média de longo termo; vermelho: previsão de vazão baseada na chuva observada).

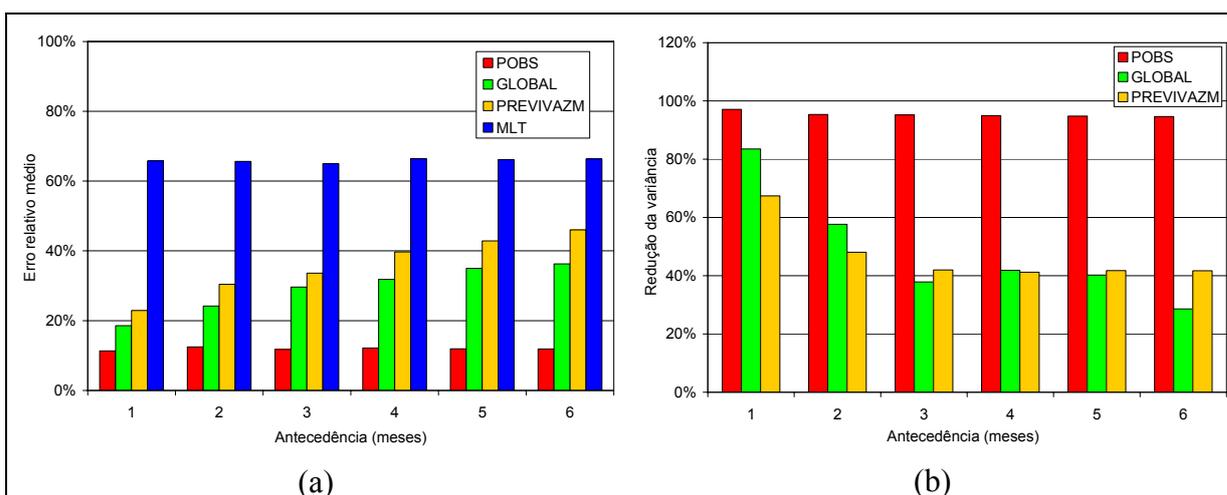


Figura 8.20: (a) Erro Relativo Médio e (b) RV, em relação a MLT, das previsões de vazão natural em Sobradinho, com antecedências de 1 a 6 meses.

Em termos de redução da variância (Figura 8.20b), os resultados mostram o mesmo comportamento observado no gráfico da Figura 8.19a (*RMSE*). Ambos os modelos são

melhores do que a MLT, pois os valores de RV são positivos para todas as antecedências. O modelo hidroclimático tem melhor desempenho do que o PREVIVAZM, em termos de RV , para um, dois e quatro meses. Entretanto, as diferenças entre os resultados dos dois modelos são pequenas e os erros são muito elevados, quando comparados com o simples uso da MLT.

8.2 Previsões de Vazão Baseadas nas Previsões Climáticas do Modelo ETA do CPTEC

As previsões de precipitação do modelo ETA, interpoladas de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 7, foram utilizadas como dados de entrada para o modelo hidrológico, gerando previsões de vazão com até 6 meses de antecedência. Estas previsões foram realizadas iniciando sempre no primeiro dia de cada mês, estendendo-se até cerca de 180 dias (6 meses), em intervalo de tempo diário. Até o último dia antes do início da previsão foram utilizadas, como dados de entrada do modelo hidrológico, as chuvas observadas nos postos pluviométricos, interpoladas para as células do modelo hidrológico. Até o último dia antes do início da previsão também é realizada a atualização das variáveis de estado do modelo hidrológico, como as vazões dos rios e o armazenamento de água nos reservatórios lineares simples que representam a água contida nos aquíferos.

De forma análoga ao apresentado para as previsões do modelo AGCM, para a comparação entre as previsões, os resultados foram organizados como hidrogramas previstos com antecedência constante, conforme descrito nos itens seguintes.

8.2.1 Resultados em Três Marias

Na Figura 8.21 são apresentadas as previsões de vazão para Três Marias, nas antecedências de um a seis meses. Além das previsões de vazão obtidas com as previsões do modelo ETA (linha verde) e da vazão natural (linha azul) são apresentadas previsões do modelo PREVIVAZM (linha laranja), já discutidas no item 8.1, e a MLT (linha preta tracejada).

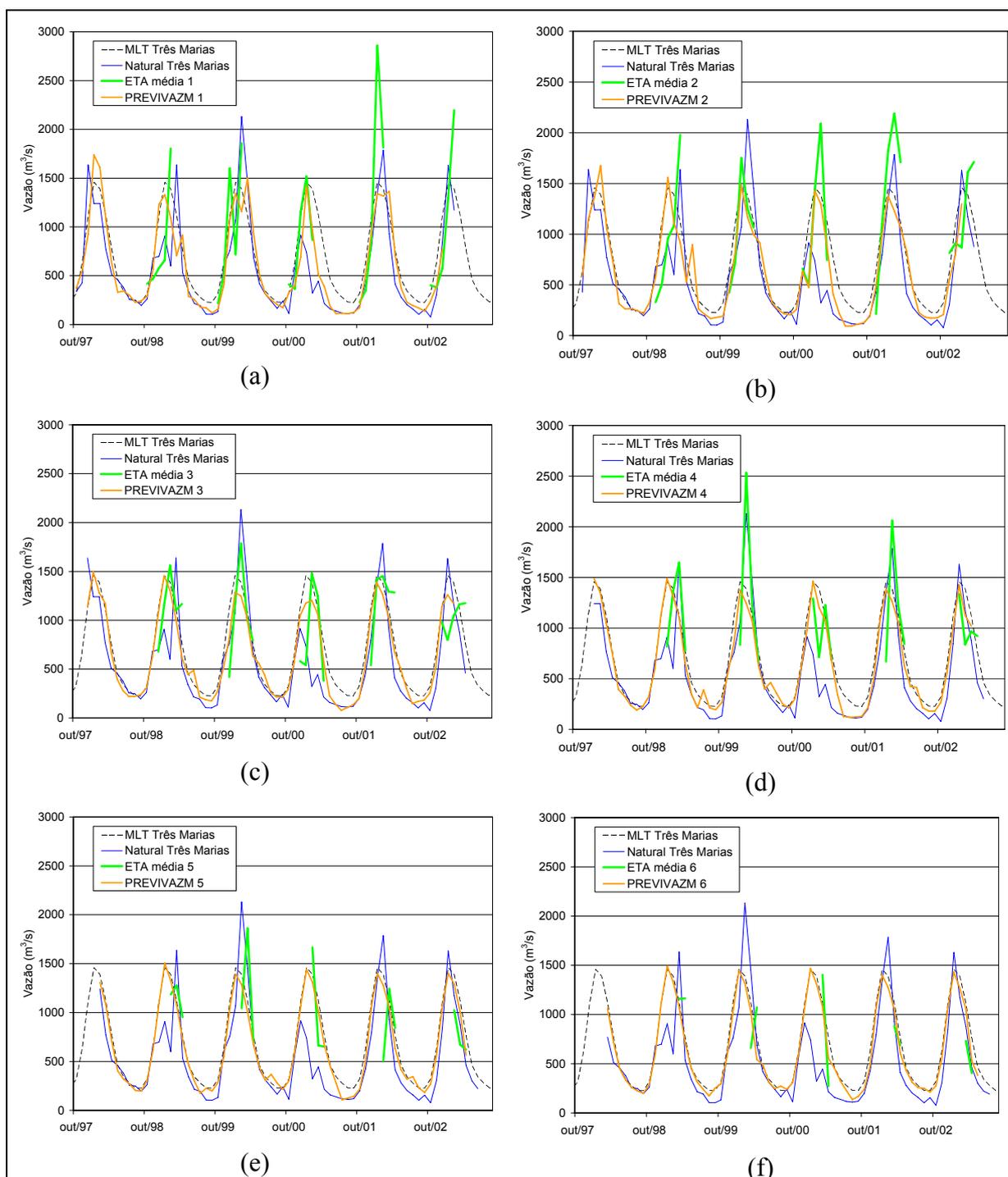


Figura 8.21: Previsões de vazão natural em Três Marias com de antecedências de 1 a 6 meses. A linha azul é a vazão natural; a linha verde é a vazão prevista com base no modelo ETA; a linha laranja é a previsão do modelo PREVIVAZM; a linha tracejada é a vazão natural média de longo termo.

Para um mês de antecedência (Figura 8.21a), se observa que a média dos 5 membros do modelo ETA superestima significativamente o pico das vazões dos verões de 2000/2001 a

2002/2003, embora tenha representado bem a fase de subida dos hidrogramas. O melhor resultado é obtido para o verão de 1999/2000.

Para as antecedências de 2 a 4 meses o desempenho das previsões de maneira geral diminui, mas também melhora para alguns períodos. No caso da antecedência de 4 meses, por exemplo, as previsões do ETA melhoram para a maioria dos verões. Para as antecedências de 5 e 6 meses o número de pontos disponíveis é muito pequeno em cada verão, prejudicando as análises.

Dessa forma, embora os resultados do modelo estocástico PREVIVAZM não sejam bons, comparando as previsões dos modelos, observa-se que as previsões do modelo ETA também não demonstram qualquer benefício em relação ao modelo PREVIVAZM.

Essa análise pode ser comprovada por um exame simples dos erros médios, medidos pelo índices *EMR* e *RMSE*, do período 1998 a 2003 (Figura 8.22), mostrando que as previsões baseadas no modelo hidrológico chuva-vazão, alimentado pela chuva prevista pelo modelo ETA, são inferiores ao PREVIVAZM em praticamente todas as antecedências. Nessas figuras também são apresentados os erros obtidos quando se usa a chuva observada para a previsão (POBS), que pode ser admitida como a situação de previsão perfeita da chuva, ou seja, com os menores erros possíveis na vazão.

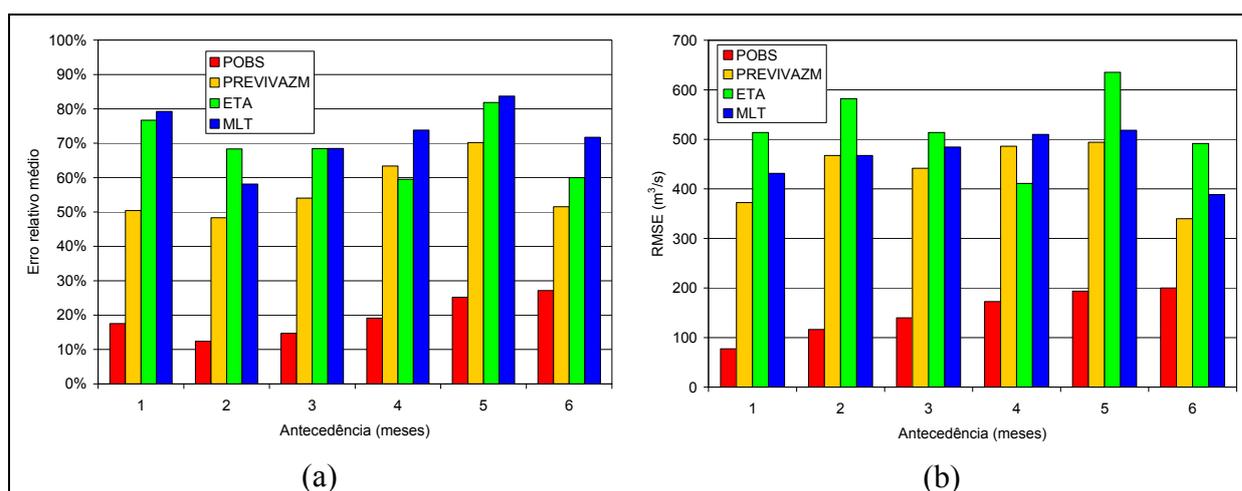


Figura 8.22: *EMR* e *RMSE* das previsões de vazão natural em Três Marias, de 1 a 6 meses de antecedência, com base no modelo ETA.

8.2.2 Resultados em Sobradinho

Na Figura 8.23 são apresentadas as previsões de vazão para Sobradinho para as antecedências de 1 a 6 meses. De forma semelhante ao apresentado para os outros casos analisados, além das previsões de vazão obtidas com as previsões do modelo ETA (linha verde) e da vazão natural (linha azul) são apresentadas as previsões obtidas com o modelo PREVIVAZM (linha laranja) e a MLT (linha preta tracejada).

Conforme já mencionado para as previsões do modelo AGCM, são estimadas perdas constantes de água de 250 m³/s, entre Bom Jesus da Lapa e Morpará e entre Morpará e Sobradinho, com base na comparação entre vazões observadas nos postos fluviométricos e no reservatório de Sobradinho.

As previsões com antecedência de apenas um mês (Figura 8.23a) estão sempre muito próximas da vazão natural, o que se deve à memória de alguns dos principais rios e ao longo tempo de propagação das vazões ao longo do rio São Francisco. Assim, as primeiras duas semanas são razoavelmente bem previstas mesmo que a previsão de chuva seja ruim, e isso influencia fortemente o resultado avaliado no primeiro mês. Para antecedências maiores o desempenho do modelo regional é bastante reduzido. Os principais erros são produzidos para o verão de 2000/2001, que foi bastante superestimado para as antecedências de dois e três meses.

Infelizmente, no período analisado não foi registrado um único ano com vazões acima da média, o que introduz uma tendência nos dados e impede conclusões mais definitivas sobre a qualidade das previsões de vazão utilizando a metodologia proposta, baseada nas chuvas previstas pelo modelo ETA do CPTEC.

O modelo estocástico PREVIVAZM prevê razoavelmente bem as vazões com um mês de antecedência, mas para antecedências maiores a previsão estocástica tende a se aproximar da vazão média de longo termo. As previsões do modelo ETA com um mês de antecedência também são muito boas, mas para as maiores antecedências os resultados não têm qualquer vantagem clara em relação ao modelo PREVIVAZM.

Essa análise pode ser comprovada por um exame simples dos valores dos índices *EMR* e *RMSE* (Figura 8.24a,b), mostrando que as previsões baseadas no modelo hidrológico chuva-vazão em Sobradinho, alimentado pela chuva prevista pelo modelo ETA, são inferiores ao PREVIVAZM em praticamente todas as antecedências.

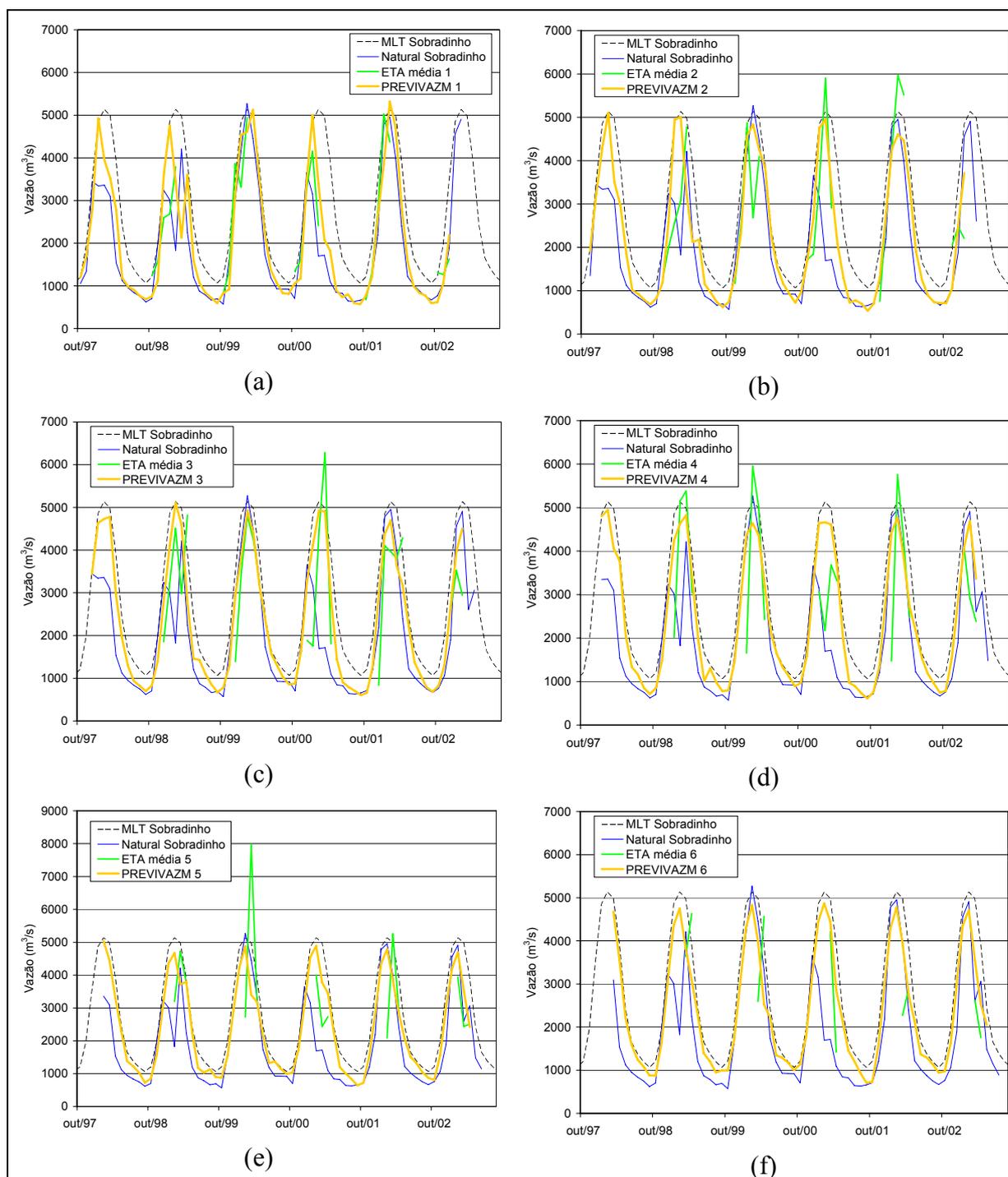


Figura 8.23: Previsões de vazão natural em Sobradinho com de antecedências de 1 a 6 meses. A linha azul é a vazão natural; a linha verde é a vazão prevista com base no modelo ETA; a linha laranja é a previsão do modelo PREVIVAZM; a linha tracejada é a vazão natural média de longo termo.

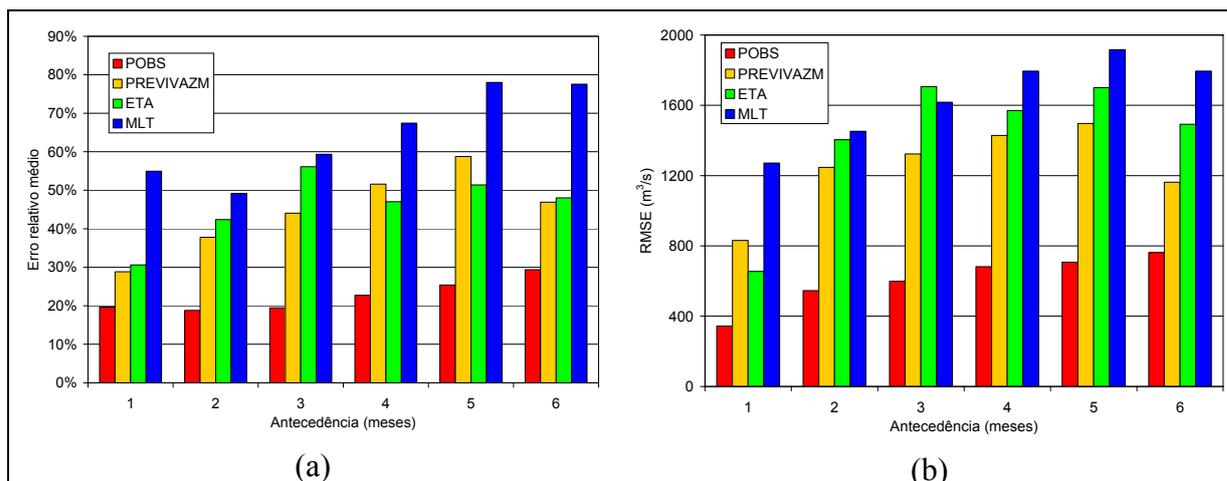


Figura 8.24 *EMR* e *RMSE* das previsões de vazão natural em Sobradinho, de 1 a 6 meses de antecedência, com base no modelo ETA.

8.3 Comentário sobre os Resíduos da Previsão de Longo Prazo

Não foram testados modelos de resíduos para as previsões de vazão de longo prazo, por dois motivos principais. Primeiro, devido ao número reduzido de previsões disponíveis. Embora o período analisado seja praticamente o mesmo das previsões de curto prazo, as previsões são de periodicidade mensal.

Segundo, maior parcela dos erros nas previsões de curto prazo se deve ao modelo hidrológico, os erros são sistemáticos e de pequena magnitude. Mas, nas previsões de longo prazo os erros de devem aos modelos atmosféricos. Os resultados mostram que as previsões não foram capazes de identificar claramente o comportamento das vazões. Anos semelhantes, em termos de vazão observada, foram previstos com resultados bastante diferentes. Os erros não mostram qualquer comportamento sistemático e são de grande magnitude, principalmente nos períodos úmidos.

A metodologia de correção dos resíduos deve ser entendida como um “ajuste fino”, de uma previsão que já pode ser considerada de boa qualidade. Entendendo-se como boa, a previsão que é capaz de identificar mudanças no comportamento das vazões, ou seja, para antecedências de longo prazo, a previsão deve ter a capacidade de antecipar anos abaixo e acima da média histórica. Portanto, as previsões apresentadas nesse capítulo não mostraram as características adequadas para aplicação da correção dos resíduos.

8.4 Resumo do Capítulo

Os resultados mostraram que as previsões de vazão mensal com base no modelo hidroclimático, utilizando o modelo AGCM, apresentam pequenas vantagens em relação ao modelo estocástico PREVIVAZM para todas as antecedências somente em Sobradinho. Em Três Marias os resultados do modelo hidroclimático são inferiores ao modelo estocástico em quase todas as antecedências. A redistribuição da chuva diária não apresentou melhora significativas na previsão de vazões, embora tenha reduzido os erros nas precipitações de intervalos mensais a semestrais.

Para o modelo regional ETA, os resultados indicam que as previsões de vazão a partir da chuva prevista por esse modelo não apresentaram vantagens em relação ao modelo estocástico PREVIVAZM.

Pelas características dos erros apresentados pelos modelos hidroclimáticos testados, sem comportamento sistemático, e pelo reduzido número de previsões, não foram utilizados modelos de previsão dos resíduos para as previsões de vazão de longo prazo.

Em virtude do pequeno número de anos de previsão, caracterizado por se manter abaixo da média histórica, os resultados também não permitiram estabelecer conclusões definitivas sobre a capacidade dos modelos em identificar anos excepcionalmente secos ou úmidos. Além disso, para os modelos regionais foram utilizados somente parte do período úmido de um total de 5 anos, limitando as conclusões em relação ao modelo global.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Essa pesquisa teve por objetivo principal testar a seguinte hipótese: *É possível aprimorar previsões de vazão de curto e longo prazo, reduzindo as incertezas das estimativas, através do uso integrado de modelos atmosféricos e hidrológicos determinísticos (previsão hidroclimática).*

Para verificar a hipótese proposta, ao longo da pesquisa foram realizados os seguintes desenvolvimentos:

- O modelo hidrológico MGB-IPH foi ajustado para simulação de vazões na bacia do Rio São Francisco (Área de 639.000 km²).
- Foram integradas as previsões do modelo atmosférico global e regional ETA (CPTEC/INPE), com o modelo MGB-IPH. As previsões foram realizadas para toda a bacia do rio São Francisco, mas são analisadas com enfoque nas afluições dos reservatórios hidrelétricos das usinas Três Marias e Sobradinho.
- Para as antecedências de curto prazo utilizaram-se previsões de precipitação com alcance de 10 dias, geradas pelo modelo ETA. As previsões de vazão foram feitas para horizontes de 28 dias para as usinas de Três Marias e Sobradinho. A partir do décimo dia considerou-se a chuva igual a zero.
- Nas antecedências de longo prazo utilizaram-se previsões climáticas do modelo AGCM do CPTEC e regional ETA, com horizontes de até 6 meses.
- Os resíduos da previsão de vazão de curto prazo foram analisados e utilizaram-se modelos do tipo estocástico e função de transferência para previsão dos erros futuros. Nas previsões de longo prazo não se utilizaram modelos de previsão dos resíduos.

A partir da análise dos resultados obtidos, conclui-se que a hipótese testada é verdadeira, ou seja, *é possível reduzir as incertezas das previsões de vazão através da metodologia de previsão hidroclimática.*

A seguir são detalhadas as principais conclusões dos estudos realizados e algumas recomendações para pesquisas futuras.

9.1 Conclusões

Ajuste do modelo hidrológico na bacia do rio São Francisco

O ajuste de modelos hidrológicos distribuídos é fortemente dependente da qualidade dos dados disponíveis, incluindo a distribuição espacial e temporal dos mesmos. Na bacia do rio São Francisco, embora os dados disponíveis tenham sido suficientes para um bom ajuste do modelo MGB-IPH, constatou-se que existem deficiências importantes de dados pluviométricos, principalmente nas regiões semi-áridas do médio e baixo São Francisco. Apesar dessas regiões terem pouca contribuição na vazão média do rio São Francisco, eventos recentes de grande intensidade, como ocorrido no início de 2004, demonstram que essas bacias podem provocar cheias importantes no trecho a jusante da usina de Sobradinho.

A grande carência de dados climatológicos também é destacada, assim como acontece na maioria das bacias brasileiras. Nessa pesquisa foram usadas médias mensais históricas de alguns postos. Isso não traz grandes prejuízos em aplicações de previsão, uma vez que as estimativas para o futuro obrigam o uso de valores médios. Mas, em aplicações para avaliação de alterações no uso do solo e mudanças climáticas, por exemplo, os dados climatológicos são de grande importância e exigem o uso de séries observadas de boa qualidade.

Os dados físicos obtidos para a bacia podem ser considerados de boa qualidade, e possibilitaram determinar os mapas de grupos de tipos de solos e grupos de uso do solo e cobertura vegetal adequados às necessidades do modelo. Entretanto, deve-se salientar que o uso de mapas mais detalhados, principalmente de solos, pode melhorar os resultados do modelo, facilitando o ajuste pela redução do número de parâmetros calibráveis.

As inconsistências de continuidade nas vazões, encontradas no trecho entre o posto fluviométrico Bom Jesus da Lapa e a usina de Sobradinho, são consideradas demasiadamente grandes e agregam elevadas incertezas às aflúncias da usina de Sobradinho. Eliminar tais inconsistências é uma necessidade urgente, em face da importância dessas vazões para as atividades localizadas a jusante do trecho, que incluem grandes usinas hidrelétricas, cidades importantes e extensas áreas de irrigação. Para as simulações com o modelo MGB-IPH, essas

inconsistência foram consideradas perdas não explicadas e são feitas retiradas constantes de 250 m³/s no posto Morpará e em Sobradinho

As estatísticas de avaliação de ajuste do modelo MGB-IPH são elevadas na fase de calibração, com coeficientes de Nash-Sutcliffe maiores do que 0,80 na maioria das sub-bacias. Na fase de verificação ocorrem esperadas reduções de qualidade em algumas sub-bacias, mas ainda assim as simulações permanecem muito boas. De maneira geral, os resultados do ajuste do modelo mostram que desempenho é plenamente satisfatório para os objetivos da pesquisa, pois é capaz de representar muito bem as vazões observadas nos postos fluviométricos e as vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos.

Previsões de vazão de curto prazo

Para a usina de Três Marias os resultados das previsões de vazão natural de curto prazo indicam que, o modelo baseado nas previsões do ETA apresentou bons resultados para as antecedências de uma e duas semanas. Em horizontes maiores, de três e quatro semanas, a qualidade das previsões piora bastante, pois é usada chuva zero após o décimo dia e se extrapola demasiadamente a memória da bacia.

Os resultados também mostram que os erros médios relativos são elevados em Três Marias, devido à existência de diferenças importantes nos períodos de estiagem. Esses erros ocorrem porque, algumas vezes, o modelo ETA previu chuva que não ocorreu, mas em outros casos são notadas inconsistências nas séries de vazões naturais, que não representam alguns picos no período de estiagem, e que existem porque são gerados pelo modelo quando se usa chuva observada. As inconsistências das vazões naturais ocorrem, provavelmente, porque essas vazões são geradas por meio de balanço hídrico do reservatório, que muitas vezes filtra pequenas variações nos hidrogramas.

Na usina de Sobradinho, os resultados são melhores do que em Três Marias, devido a grande memória da bacia contribuinte. A grande extensão da bacia filtra as variações da chuva e, para antecedências até duas semanas, a influência da precipitação prevista é pequena nas vazões. Somente a partir da terceira semana são notados erros elevados, causados pelas limitações no conhecimento da precipitação.

Portanto, as previsões hidroclimáticas de curto prazo são bastante promissoras para a bacia do rio São Francisco, particularmente no horizonte de até duas semanas em Três Marias e até 4 semanas em Sobradinho. Além do bom desempenho no período estudado, destaca-se

que o modelo foi capaz de antecipar fortes crescimentos nas vazões. Essa característica é de grande importância para a geração de energia e controle de cheias e que, no entanto, os modelos estocásticos têm dificuldade em prever.

Para a previsão dos resíduos, o modelo que apresentou melhores resultados em Três Marias foi o do tipo função de transferência, que inclui um termo autoregressivo dos resíduos e a precipitação prevista pelo ETA como variável explicativa. O mesmo tipo de modelo foi ajustado para uma e duas semanas de antecedência. Para atualização dos modelos foi usada uma janela móvel constante de 156 semanas e os melhores resultados são notados a partir de 2002, quando os erros passam a se comportar de forma sistemática.

Em Sobradinho também foram ajustados modelos de resíduos para uma e duas semanas. Devido à mudança de comportamento dos erros a partir do ano 2001, foram ajustados modelos diferentes para os períodos antes e a partir desse ano. Entre 1996 e 2000 os erros são bastante sistemáticos e com sazonalidade bem definida, mas a partir de 2001 a sazonalidade desaparece. Para uma semana de antecedência os modelos ajustados foram autoregressivos de ordem dois, nos dois períodos, e mostraram excelentes resultados. Para duas semanas os modelos foram autoregressivos de ordem um, também com resultados muito bons nos dois períodos entre 1996 e 2003.

Portanto, a integração de modelos do tipo estocástico, para correção da vazão prevista pelo modelo hidroclimático, apresentou benefícios significativos. Ou seja, apesar da grande sofisticação dos modelos determinísticos usados nessa pesquisa, a carência de dados e a dificuldade em representar alguns processos conduzem a erros que justificam o emprego dos modelos de correção.

Previsões climáticas de precipitação

As previsões climáticas do modelo AGCM do CPTEC apresentam erros sistemáticos de superestimativa da precipitação em toda a bacia do rio São Francisco. De maneira geral, a região norte da bacia apresentou maiores superestimativas, mas o modelo representou bem a variabilidade interanual, ou seja, distinguiu claramente os anos secos e úmidos. Na região sul da bacia, junto às cabeceiras, as superestimativas são menores, mas o modelo não representou bem a variabilidade interanual.

A correção dos erros sistemáticos pela técnica baseada nas distribuições empíricas de probabilidade foi bastante eficiente. A chuva prevista corrigida apresenta correlações altas

com a chuva observada, mas se observam erros de grande magnitude durante os períodos úmidos.

Quanto à distribuição temporal da chuva prevista diária, do modelo AGCM, se verificou que o modelo tende a superestimar as menores precipitações e subestima os máximos diários. De maneira geral, esse comportamento é mais evidente nas células ao norte da bacia. A redistribuição da chuva diária prevista permitiu uma redução dos erros médios da chuva prevista para Sobradinho, principalmente nos valores trimestrais e quadrimestrais.

As previsões de precipitação geradas pelos modelos climáticos regionais ETA não apresentaram erros sistemáticos sobre a bacia do rio São Francisco, tanto nas resoluções de 40 km como de 20 km. Dessa forma, essas previsões de precipitação não passaram por qualquer processo de correção estatística. De maneira geral, os resultados dos modelos regionais foram inferiores aos obtidos com o modelo global, apresentando grandes superestimativas em todas as antecedências.

Previsões de vazão com base nas previsões dos modelos climáticos AGCM e ETA

Na usina de Três Marias as previsões de vazão natural do conjunto de cinco membros do modelo hidroclimático, com chuva prevista pelo modelo AGCM, apresentam dispersão excessiva durante os períodos úmidos. Analisando a média dos cinco membros, com exceção da antecedência de 1 mês, o modelo hidroclimático não mostrou capacidade de distinguir o verão extremamente seco de 2000/2001 dos demais anos, que foram muito próximos da MLT. Em termos de vazões trimestrais e semestrais os resultados também foram ruins.

Em termos de erros médios, as previsões do modelo hidroclimático não são inferiores ao modelo estocástico PREVIVAZM somente nas antecedências de 1 e 2 meses. Nas demais antecedências o modelo climático apresenta resultados inferiores até mesmo a MLT, que é considerado o modelo alternativo mais simples.

Para a usina de Sobradinho, os resultados com a chuva do modelo AGCM são um pouco melhores do que em Três Marias. Mas, mesmo nesse caso, a dispersão entre os cinco membros é muito grande a partir de dois meses de antecedência. O modelo prevê bem o período úmido de 2000/2001 com até dois meses de antecedência, mas erra consideravelmente ao prever que os anos seguintes seriam iguais. Em termos de vazões médias trimestrais e semestrais, as previsões não mostram resultados melhores.

A análise dos erros médios mostra que, as previsões hidroclimáticas para a usina de Sobradinho apresentam pequenas vantagens em relação ao modelo estocástico PREVIVAZM para todas as antecedências. Entretanto, as vantagens são significativas somente para um e dois meses de antecedência.

A redistribuição da chuva diária prevista não representou ganhos para a previsão de vazões, tanto em Três Marias como em Sobradinho. Acredita-se que, a correção da distribuição temporal da chuva prevista, somente trará benefícios quando as previsões dos volumes mensais precipitados se tornarem mais precisos. De maneira geral, esses erros ainda são muito elevados e se ampliam na transformação chuva-vazão, devido a não-linearidade dos processos envolvidos.

Utilizando as previsões climáticas do modelo regional ETA, os resultados indicam que as vazões previstas não apresentaram vantagens em relação ao modelo estocástico PREVIVAZM, tanto no caso de Três Marias como de Sobradinho. Nota-se que o modelo regional corrigiu grande parte dos erros sistemáticos da chuva prevista pelo modelo global, mas, de maneira geral, mantêm-se os erros elevados dos totais mensais precipitados e a incapacidade de distinguir entre anos os anos excepcionalmente secos (2000/2001) e os que estão próximos da média histórica.

Pelas características dos erros apresentados pelos modelos hidroclimáticos testados, sem comportamento sistemático, e pelo reduzido número de previsões, não foram utilizados modelos de previsão dos resíduos para as previsões de vazão de longo prazo.

O pequeno número de anos de previsão, caracterizados por vazões muito próximas da média histórica, não permitiram estabelecer conclusões definitivas sobre a capacidade dos modelos em identificar anos excepcionalmente secos ou úmidos. Entretanto os resultados das previsões de vazão de longo prazo, com o modelo global e o regional, refletem as observações a respeito da climatologia do modelo AGCM e as análises de Marengo et al. (2003), que indicam que o modelo não possui capacidade de detectar a variabilidade interanual, nas células localizadas sobre a região alta da bacia (até o posto São Francisco). Resultando que, nas sub-bacias que mais contribuem com as vazões do rio São Francisco, o modelo AGCM possui previsibilidade muito baixa. Portanto, a melhora das previsões de vazão de longo prazo na bacia do rio São Francisco depende, fundamentalmente, do desenvolvimento da capacidade dos modelos climáticos na região do alto São Francisco.

Salienta-se ainda que as previsões do modelo PREVIVAZM foram favorecidas pelos anos do período de estudo, que apresentam vazões próximas da MLT em quase todos os verões. Os resultados desse modelo mostram que, de maneira geral, a partir de dois meses de antecedência as previsões do PREVIVAZM tendem a se aproximarem da MLT, ou seja, o modelo estocástico também não mostra capacidade de detectar variabilidades interanuais.

9.2 Recomendações

Os resultados obtidos nessa pesquisa devem ser vistos dentro de um processo evolutivo de conhecimento onde se buscam respostas às necessidades de diversas atividades, como o setor elétrico brasileiro. Por isso, a seguir são apresentadas algumas recomendações de aprimoramentos na metodologia de previsão hidroclimática, que podem ser explorados em estudos futuros:

Informações da bacia e ajuste do modelo hidrológico

Conforme salientado nas conclusões, as inconsistências das vazões nos trechos entre os postos Bom Jesus da Lapa e Morpará, e entre Morpará e a usina Sobradinho são muito elevadas. Relatórios recentes de consistência de dados (ONS, 2003a,b) sugerem ações para o trecho entre Morpará e Sobradinho, mas não mencionam o problema no trecho de montante, que possui a mesma magnitude de valores. Dentre as principais ações recomendadas, podem ser incluídas: um diagnóstico completo do reservatório de Sobradinho; estudos sobre a evapotranspiração na região semi-árida (principalmente na área de influência de Sobradinho), e campanhas de medição de vazões utilizando instrumentos como o ADCP. A região localizada imediatamente a jusante desses trechos é historicamente carente de recursos hídricos e possui importantes atividades econômicas, que são naturalmente conflitantes e justificam a tomada de ações urgentes na busca de respostas para as diferenças encontradas nessas vazões.

As simulações com o modelo hidrológico MGB-IPH, que possui forte embasamento físico, mostram que existem deficiências importantes nas séries de vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos. Essas séries são obtidas por balanço hídrico dos reservatórios, que podem introduzir muitas inconsistências nas vazões, devido a erros em dados como a

relação cota-volume dos reservatórios. Dentre os problemas normalmente encontrados estão a existências de variações bruscas (degraus), principalmente nas vazões de estiagem, e ausência de picos de vazões, que foram filtrados no cálculo do balanço. Essas inconsistências são mais evidentes em Três Marias e tiveram forte influência nos resultados das simulações e previsões, pois muitas vezes os parâmetros do modelo MGB-IPH são distorcidos para tentar representar comportamentos que não são corretos fisicamente. Uma aplicação do modelo MGB-IPH, que pode ser interessante para o setor elétrico, é utilizar as simulações desse modelo para detectar e corrigir inconsistências nas séries de vazões naturais diárias, como as citadas anteriormente.

Embora o modelo MGB-IPH tenha simulado adequadamente as vazões na bacia do rio São Francisco, os resultados ainda podem ser melhorados, seja através da introdução de dados de melhor qualidade ou pelo melhor entendimento dos processos físicos representados pelo modelo. Destacam-se as bacias da região semi-árida, onde o modelo apresentou os piores resultados. Nessa região as informações hidrometeorológicas são escassas, mas talvez também sejam necessárias mudanças na estrutura do modelo para representar, por exemplo, os efeitos causados por diversos pequenos açudes que não possuem cadastros oficiais e, portanto não se conhecem as características físicas.

Previsões de vazão de curto prazo

Os resultados das previsões hidroclimáticas de curto prazo foram considerados muito bons. Os dados de previsão de precipitação do modelo ETA foram cedidos pelo ONS, através do projeto “Modelo de Previsão de Vazões com Incorporação de Informação de Precipitação”, que analisa previsões em diversas bacias brasileiras e com diferentes tipos de modelos. A bacia do rio São Francisco não está, em princípio, sendo analisada pelo ONS, mas os resultados dessa pesquisa são seguramente de grande interesse.

Portanto, recomenda-se uma comparação das previsões de curto prazo, obtidas nessa pesquisa, com as previsões operacionais do ONS, que utiliza o modelo estocástico PREVIVAZ em Três Marias e CPINS/PREVIVAZ em Sobradinho. No caso das previsões para Sobradinho, as comparações também devem ser feitas considerando a previsão de vazões naturais incrementais no trecho entre Três Marias e Sobradinho. Nessa pesquisa foram calculadas somente as previsões totais em Sobradinho, mas o modelo MGB pode ser adaptado para calcular as vazões incrementais.

Os modelos de previsão dos resíduos mostraram bons resultados nos locais em foram utilizados (Três Marias e Sobradinho). Entretanto, algumas análises ainda podem ser feitas na tentativa de melhorar os resultados. Um exemplo é utilizar uma janela crescente para atualização dos parâmetros, mas com um fator de “esquecimento”, ou seja, cada valor da série de resíduos tem um peso no ajuste, que decresce a medida que se tornam distantes do tempo atual. Pode-se tentar diferentes funções de decaimento. Outra análise é tentar ajustar modelos diferentes para o período úmido e de estiagem, uma vez que os erros tendem a serem maiores durante os meses chuvosos.

Previsões de vazão de longo prazo

O período para o qual foram feitas as previsões (1997 a 2003) pode ter sido tendencioso, uma vez que se caracterizou por vazões muito próximas da média histórica. Recomenda-se explorar um período mais extenso, que inclua anos com vazões abaixo e acima da média, permitindo avaliar melhor o desempenho dos modelos climáticos na estimativa de anos com valores extremos de estiagem ou cheias.

Entretanto, salienta-se novamente que, a melhora nas previsões de vazão na bacia do rio São Francisco, depende fortemente do melhor desempenho dos modelos climáticos na região do alto São Francisco. Nesse sentido, novos desenvolvimentos estão sendo implantados no modelo AGCM do CPTEC e que, brevemente, poderão ser incorporados a metodologia. Um desenvolvimento importante se refere ao acoplamento do modelo global com um modelo oceânico, que poderá melhorar a representação dos fenômenos climáticos que afetam a região do alto São Francisco.

Os resultados das previsões de vazão com o modelo regional ETA mostraram grandes variabilidades, com erros excessivos de sub e superestimativa. Recomenda-se que esse comportamento seja investigado, pois praticamente inviabilizou a utilização do modelo regional nas previsões de vazão. Além disso, estudos futuros devem realizar previsões climáticas contínuas, com o modelo ETA, por períodos de anos hidrológicos completos, e não somente parte dos meses úmidos.

Uso das previsões de vazão

É importante salientar que o uso final da previsão também deve ser incluído neste processo. Diversos trabalhos têm mostrado a importância do desenvolvimento de técnicas que permitam avaliar a utilidade da previsão sob o ponto de vista do usuário final (Zhu et al., 2002; Mylne, 2002; Wilks, 2002; Stewart et al., 2004; Pielke e Carbone, 2002; Roulston e Smith, 2004; Dutton, 2002). Ou seja, é preciso responder a perguntas como: qual a confiabilidade da previsão?, qual a informação mais importante para o usuário? ou qual o formato ele quer receber os dados?, como otimizar o uso da previsão? e qual o valor econômico da previsão?. Esse deve ser um processo com forte interação entre os dois lados (previsor e usuário), possibilitando aprimorar a metodologia de previsão e ampliar o seu potencial de benefícios para a sociedade.

Como exemplo dos potenciais benefícios da previsão de vazão, destaca-se o trabalho de Maurer (2002), que avaliou os ganhos das previsões de longo prazo para diferentes reservatórios da bacia do rio Missouri (EUA). Nesse trabalho foram comparados os benefícios da geração hidrelétrica em condições de previsão perfeita (ou operação ótima) e ausência de previsão (ou com pequena consideração do conhecimento da previsão). Em cada estudo, os benefícios foram relacionados com a razão entre volume útil do reservatório e volume médio anual afluente ao mesmo, resultando nos pontos apresentados na Figura 9.1.

Os resultados mostram que quanto maior a capacidade de acumulação do reservatório, em relação às vazões afluentes, menor será o potencial de benefício proporcionado pela previsão. Esse resultado ocorre porque reservatórios muito grandes em relação ao volume afluente anual raramente deixam de acumular água por falta de capacidade de armazenamento. Nesse caso, a otimização da operação obtida a partir do conhecimento antecipado das vazões afluentes futuras apresenta um benefício relativamente pequeno. Mas, em reservatórios relativamente pequenos, são freqüentes as situações em que é necessário tomar decisões sobre armazenar ou gerar energia, e boas previsões de vazão afluente podem ser utilizadas para subsidiar essa tomada de decisão.

Admitindo-se uma tendência média aos pontos obtidos por Maurer e Lettenmaier (2002) é possível fazer uma estimativa do potencial de benefícios da previsão para os principais reservatórios da bacia do São Francisco, Três Marias e Sobradinho. Na Tabela 9.1 são apresentados os dados de volume destes reservatórios e uma estimativa do incremento de benefício promovido pela previsão, que pode ser visualizada na Figura 9.1. Nota-se que, em

ambos os reservatórios, o potencial de aplicação da previsão é relativamente elevado, uma vez que apresentam baixa capacidade de acumulação em relação as suas vazões afluentes.

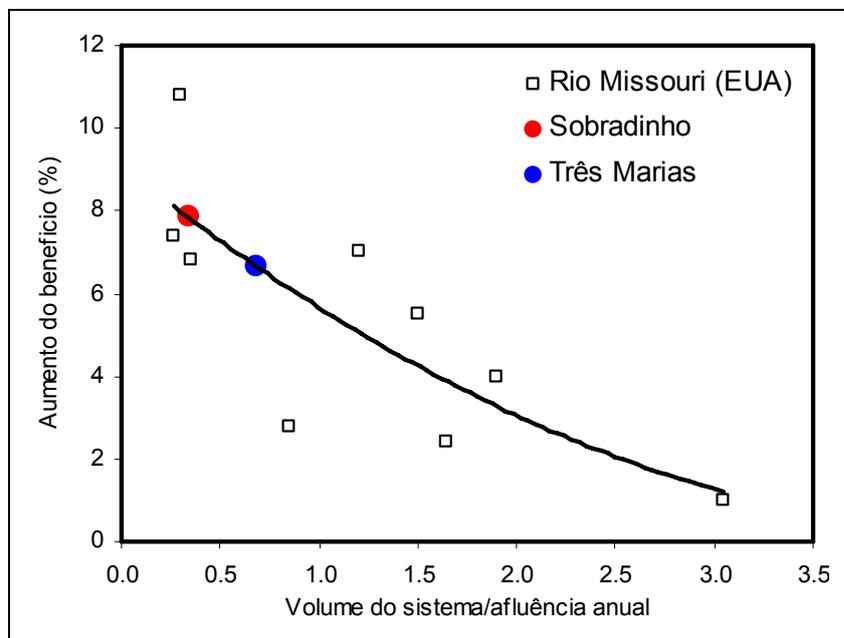


Figura 9.1: Aumento de benefício entre previsão perfeita e a ausência de previsão de vazões. Estimativas para as usinas Três Marias e Sobradinho. (Adaptado de Maurer, 2002)

Entretanto, essa é apenas uma estimativa simplificada, que visa ilustrar os potenciais benefícios da previsão. Deve-se observar que o cálculo do valor dos benefícios das previsões necessita levar em conta diversos fatores, como a variabilidade das afluências e da demanda, e a capacidade dos modelos de operação em se beneficiar da previsão.

Tabela 9.1: Estimativa do incremento de benefício nos reservatórios de Três Marias e Sobradinho

Reservatório	Volume Útil (10^9 m^3)	Vazão Afluente Anual (m^3/s)	Vazão Afluente Anual (10^9 m^3)	Vol. Útil / Vol Afluente	Aumento de Benefício Estimado (%)
Três Marias	28,7	705,0	22,2	0,69	7,83
Sobradinho	15,3	2.683	84,6	0,34	6,64

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLA, F.A.; LETTENMAIER, D.P. Application of regional parameter estimation schemes to simulate the water balance of a large continental river. **Journal of Hydrology**. V.197, p.258-285. 1997a.
- ABDULLA, F.A.; LETTENMAIER, D.P. Development of regional parameter estimation equations for a macroscale hydrologic model. **Journal of Hydrology**. V.197, p.230-257. 1997b.
- ANDERSON, M.L.; CHEN, Z.-Q.; KAVVAS, M.L.; FELDMAN, A. Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for Prediction of Watershed Runoff. **Journal of Hydrologic Engineering**. V.7, n.4, jul, p.312-318. 2002.
- ANDERSON, M.L.; KAVVAS, M.L.; MIERZWA, M.D. Probabilistic/ensemble forecasting: a case study using hydrologic response distributions associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). **Journal of Hydrology**. V.249, p.134-147. 2001.
- ANDERSON, J.L.; PLOSHAY, J.L. Impact of initial conditions on seasonal simulations with an atmospheric general circulation model. **Quarterly Journal of Royal Meteorology Society**. V.126, p.2241-2264. 2000.
- ANDREOLLI, I. **Previsão de Vazão em Tempo Real no Rio Uruguai com Base na Previsão Meteorológica**. Porto Alegre: UFRGS. Dissertação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 182p. 2003.
- ARNELL, N.W. A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. **Journal of Hydrology**. Vol.217, p.314-335. 1999.
- BARNSTON, A.G.; HE, Y.; UNGER, D.A. A Forecast Product that Maximizes Utility for State-of-the-Art Seasonal Climate Prediction. **Bulletin of the American Meteorological Society**. V.81, n.6, jun, p1271-1279. 1999.

- BIFTU, G.F.; GAN, T.Y. Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River Basin, Alberta, using remotely sensed data. **Journal of Hydrology**. V.244, p.137-156. 2001.
- BONAN, G.B. **Ecological Climatology: Concepts and Applications**. New York, USA: Cambridge University Press, 678p., 2002.
- BREMICKER, M. 1998 **Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells**. Dissertation - Geowissenschaftlicher Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg. Juli.
- BURGES, S.J. Streamflow Prediction: Capabilities, Opportunities, and Challenges. In: National Research Council. **Hydrologic Sciences – Taking Stock and Looking Ahead**. Proceedings of the 1997 Abel Wolman Distinguished Lecture and Symposium on the Hydrologic Sciences. Washington, DC (EUA): National Academy of Science, 1998. 138p.
- CANTELAUBE, P.; TERRES, J.-M. Seasonal weather forecasts for crop yield modeling in Europe. . **Tellus**, Vol.57A, p.476-487. 2005.
- CARDOSO, A.O.; CLARKE, R.T.; DIAS, P.L.S. A case Study of the use of sea-surface temperatures (SSTs) as a predictor of river flows. In: WAGENER, T.; FRANKS, S.; GUPTA, H.V.; BØGH, E.; BASTIDAS, L.; NOBRE, C.; GALVÃO, C.O. **Regional Hydrological Impacts of Climatic Change – Impact Assessment and Decision Making**. United Kingdom: IAHS Publications, n.295, p.231-238. 2005.
- CASTANHARO G. at al., 2001. **Operação de Reservatórios Baseada em Previsão de Afluências de Curto Prazo em Tempo Real**. XIV Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH: Aracaju.
- CHANGNON, S.A.; VONNAHME, D.R. Impact of Spring 2000 Drought Forecasts on Midwestern Water Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**. V. 129, n.1, jan, p.18-25. 2003.
- CHEN, J.; KUMAR, P. Role of Terrestrial Hydrologic Memory in Modulating ENSO Impacts in North America. **Journal of Climate**. V.15, dez, p.3569-3585. 2002.
- CHIEW, F.H.S.; ZHOU, S.L.; McMAHON, T.A. Use of seasonal streamflow forecasts in water resources management. **Journal of Hydrology**. V.270, p.135-144. 2003.

- CIRILO, J.A. **Análise dos Processos Hidrológicos – Hidrodinâmicos na Bacia do Rio São Francisco**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. 1991.
- CIRILO, J.A. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, outubro, 2005. **(comunicação verbal)**.
- CODEVASF, Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. **Cadastro do Vale do São Francisco**. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br>>. Acesso em: julho, 2003.
- COLLIER, C.G.; KRZYZYSZTOFOWICZ, R. Quantitative precipitation forecasting. **Journal of Hydrology**. V.239, p.1-2. 2000.
- COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V.; CRUZ, M. A. S.; MENDIONDO, E. M.; MENDES, C. A. B. Simulação hidrológica utilizando o hidrograma unitário derivado do modelo numérico do terreno. **XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte. 1999.
- COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194p. 2001.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol.6, n.1. 2001.
- COLLISCHONN, W; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C.E.M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**. Vol.305, p.87-98. 2005.
- COSTA, F.S.; DAMÁZIO, J.M.; MACEIRA, M.E.P.; DENÍCIO, M. GUILHON; SILVA, S.B. **Modelo Estatístico de Previsão de Vazões Mensais – PREVIVAZM**. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba: anais em CD. 2003
- CPRM. **Sistema de Alerta contra Enchentes da Bacia do Rio Doce – Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta no Período de Dezembro de 2003 a Março de 2004**. Belo Horizonte, 2004.
- CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **O Sistema de Previsão de Tempo Global por Ensemble do CPTEC**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: Maio, 2004.

- CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **El Niño e La Niña**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/enos>>. Acesso em: junho, 2005a.
- CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Modelo ETA**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/prevnum>>. Acesso em: janeiro, 2005b.
- DOBLAS-REYES, F.J.; HAGEDORN, R.; PALMER, T.N. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting – II. Calibration and combination. **Tellus**, Vol.57A, p.234-252. 2005.
- DRUCE, D.J. Insights from a history of seasonal inflow forecasting with a conceptual hydrologic Model. **Journal of Hydrology**. V.249, p.102-112. 2001.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, Vol 158 pp. 265-284. 1994.
- DUTTON, J.A. Opportunities and Priorities in a New Era for Weather and Climate Services. **Bulletin of the American Meteorological Society**. Setembro, p. 1303-1310. 2002.
- ECMWF – European Center of Medium-Range Weather Forecasting. **Monthly Forecasting**. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/products/forecasts>>. Acesso em: fevereiro, 2005.
- ENTEKHABI, D.; ASRAR, G.R.; BETTS, A.K.; BEVEN, K.J.; BRAS, R.L.; DUFFY, C.J.; DUNNE, T.; KOSTER, R.D.; LETTENMAIER, D.P.; MCLAUGHLIN, D.B.; SHUTTLEWORTH, W.J.; VAN GENUCHEN, M.T.; WEI, M.-Y.; WOOD, E.F. An Agenda for Land Surface Hydrology Research and a Call for the Second International Hydrological Decade. **Bulletin of the American Meteorological Society**. V.80, n.10, out. 1999.
- EVANS, J.P. Improving the characteristics of streamflow modeled by regional climate models. **Journal of Hydrology**. V.284, p.211-227. 2003.
- GALVÃO, C.O. **Aplicabilidade em Recursos Hídricos da Previsão de Precipitação de Longo Prazo no Nordeste do Brasil**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. 1999.
- GEORGAKAKOS, K.P.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Probabilistic and ensemble forecasting. **Journal of Hydrology**. 249, p.1. 2001.

- GEWEX Continental-Scale International Project (GCIP). **A Review of Progress and Opportunities**. Washington DC, EUA: National Academy of Science, 1998. 93p.
- GILMAN, D.L. Long-range forecasting: The present and the future. **Bulletin of the American Meteorological Society**. V.66, p159-164. 1985.
- GLASBEY, C.A.; COOPER, G.; MCGECHAN, M.B. Disaggregation of daily rainfall by conditional simulation from a point-process model. **Journal of Hydrology**, V.165, p.1-9. 1995.
- GODDARD, L.; MASON, S.J.; ZEBIAK, S.E.; ROPELEWSKI, C.F.; BASHER, R.; CANE, M.A. **Current Approaches to Seasonal to Interannual Climate Predictions**. New York: IRI, dez, 2000. 62p.
- GOLDING B.W. Quantitative precipitation forecasting in the UK. **Journal of Hydrology**. V.239, P.286-305. 2000.
- GRAHAM, R.J.; EVANS, A.D.L.; MYLNE, K.R.; HARRISON, M.S.J.; ROBERTSON, K.B. An assessment of seasonal predictability using atmospheric general circulation models. **Quarterly Journal of Royal Meteorology Society**. V.126, p.2211-2240. 2000.
- GUTOWSKI, W.J.; VÖRÖSMARTY, C.J.; PERSON, M.; ÖTLES, Z.; FEKETE, B.; YORK, J. A Coupled Land-Atmosphere Simulation Program (CLASP): Calibration and validation. **Journal of Geophysical Research**. V.107, n.16, p.3(1-17). 2002.
- HABETS, F.; ETCHEVERS, P.; GOLAZ, C.; LEBLOIS, E.; LEDOUX, E.; MARTIN, E.; NOILHAN, J.; OTTLÉ, C. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin. **Journal of Geophysical Research**. Vol.104, n.D24, p.31145-31172. 1999.
- HABETS, F.; LEMOIGNE, P.; NOILHAN, J. On the utility of operational precipitation forecasts to served as input for streamflow forecasting. **Journal of Hydrology**. V.293, P.270-288. 2004.
- HAGEDORN, R.; DOBLAS-REYES, F.J.; PALMER, T.N. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting – I. Basic concept. **Tellus**, Vol.57A, p.219-233. 2005.
- HAMLET, A.F.; HUPPERT, D.; LETTENMAIER, D.P. Economic Value of Long-Lead Streamflow Forecasts for Columbia River Hydropower. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Vol.128, n.2. 2002.

- HAMLET, A.F.; LETTENMAIER, D.P. Columbia river streamflow forecasting based on ENSO and PDO climate signals. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Vol.125, n.6, p.333-341. 1999.
- HANSEN, J.W.; INDEJE, M. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**. Vol.125, p.143-157. 2004.
- HARTMANN, H.C.; BALES, R.; SOROOSHIAN, S. **Weather, Climate, and Hydrologic Forecasting for the Southwest U.S.** Tucson, EUA: The University of Arizona. Working Paper Series: WP2-99, fev, 1999. 172p.
- HAY, L.E.; CLARK, M.P. Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States. **Journal of Hydrology**. V. 282, p.56-75. 2003.
- HAY L.E.; CLARK, M.P.; WILBY, R.L.; GUTOWSKI JR., W.J.; LEAVESLEY, G.H.; PAN, Z.; ARRITT, R.W.; TAKLE, E.S. Use of Regional Climate Model Output for Hydrologic Simulations. **Journal of Hydrometeorology**. V.3, out, p.571-590. 2002.
- HSIEH, W.W.; YUVAL; LI, J.; SHABBAR, A.; SMITH, S. Seasonal Prediction with Error Estimation of Columbia River Streamflow in British Columbia. **Journal of Water Resources Planning and Management**. V.129, n.2, mar, p.146-149. 2003.
- HSU, M.-H.; FU, J.-C.; LIU, W.-C. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan. **Journal of Hydrology**. V. 283, p.267-280. 2003.
- IAG - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. **Comparação entre modelos**. Disponível em: <<http://www.master.iag.usp.br>>. Acesso em: Junho, 2005.
- IBBITT, R.P.; HENDERSON, R.D.; COPELAND, J.; WRATT, D.S. Simulating mountain runoff with meso-scale weather model rainfall estimates: a New Zealand experience. **Journal of Hydrology**, V.239, p.19-32. 2001.
- IPCC. **Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. A Report of Working Group II of Intergovernmental Panel of Climate Change. 2001.
- IRI, International Research Institute for Climate Prediction. **Seasonal Climate Prediction for Regional Scales**. Disponível em: <http://iri.columbia.edu/projects/climate/course_html>. Acesso em: Junho, 2004a.

- IRI, International Research Institute for Climate Prediction. **Forecasts Descriptions**. Disponível em: <<http://iri.columbia.edu>>. Acesso em: Maio, 2004b.
- JAYAWARDENA, A.W.; MAHANAMA, S.P.P. Meso-Scale Hydrological Modeling: Application to Mekong and Chao Phraya Basins. **Journal of Hydrologic Engineering**. V.7, n.1, jan/fev, p.12-26. 2002.
- JENSON, S., DOMINGUE, J. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering, and Remote Sensing**. v.54, n.11, p.1593-1600. 1988.
- JUNQUEIRA, R. A. C. (Coord.) **Mapeamento Temático de Uso da Terra no Submédio São Francisco (Resumo executivo do relatório final)**. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Brasília, DF. 2000.
- JUNQUEIRA, R. A. C. (Coord.) **Mapeamento Temático de Uso da Terra no Baixo São Francisco (Resumo executivo do relatório final)**. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Brasília, DF. 2002.
- JUNQUEIRA, R. A. C.; ROSA, K. A. C. **Mapeamento Temático de Uso da Terra no Alto São Francisco (Resumo executivo do relatório final)**. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Brasília, DF. 2002.
- KERR, R.A. Storm-in-a-Box Forecasting. **Science**. Vol.304, mai, p.946-948. 2004.
- KIMURA, R. Numerical weather prediction. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. V.90, p.1403-1414. 2002.
- KITE G.W. Simulating Columbia river flows with data from regional-scale climate models. **Water Resources Research**. V.33, n.6, jun, p.1275-1285. 1997.
- KOTTEGODA, N.T.; NATALE, L.; RAITERI, E. A parsimonious approach to stochastic multisite modelling and disaggregation of daily rainfall. **Journal of Hydrology**, V.274, p.47-61. 2003.
- KOUSSIS, A.D.; LAGOUVARDOS, K.; MAZI, K.; KOTRONI, V.; SITZMANN, D.; LANG, J.; ZAISS, H.; BUZZI, A.; MALGUZZI, P. Flood Forecasts for Urban Basin

- with Integrated Hydro-Meteorological Model. **Journal of Hydrologic Engineering**. V.8, n.1, jan/fev, p.1-11. 2003.
- KUMAR, D.N.; LALL, U.; PETERSEN, M.R. Multisite disaggregation of monthly to daily streamflow. **Water Resources Research**. V.36, n.7, jul, p.1823-1833. 2000.
- LALL, U.; SHARMA, A. A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. **Water Resources Research**. V.32, n.3, mar, p.679-693. 1996.
- LETTENMAIER D.P., WOOD E.F. Hydrologic Forecasting. In: MAIDMENT D., **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, Chapter 26. 1993.
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D.; WOOD, E. F.; BURGE, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**. V.99, n. D7, p. 14.415-14.428, July. 1994.
- LOHMANN, D.; RASCHKE, E; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. P. Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. **Hydrological Sciences Journal**. V.43, n.1; p.131-141. 1998a.
- LOHMANN, D.; RASCHKE, E; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. P. 1998b Regional scale hydrology: II. Application of the VIC-2L model to the Weser river, Germany. **Hydrological Sciences Journal**. V. 43, n.1; p.143-158. 1998b.
- LORENZ, E.N. On the Existence of Extended Range Predictability. **Journal of Applied Meteorology**. V.12, apr., p.543-546. 1973.
- MADSEN, H.; SKOTNER, C. Adaptive state updating in real-time river flow forecasting—a combined filtering and error forecasting procedure. **Journal of Hydrology**, Vol.308, P.302-312. 2005.
- MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S.C.; HYNDMAN, R.J. **Forecasting – Methods and Applications**. John Wiley & Sons: United States.1998. 642p.
- MARENGO, J.A.; CAVALCANTI, I.F.A.; SATYAMURTY, P.; TROSNICOV, I.; NOBRE, C.A.; BONATTI, J.P.; CAMARGO, H.; SAMPAIO, G.; SANCHES, M.B.; MANZI, A.O.; CASTRO, C.A.C.; D'ALMEIDA, C.; PEZZI, L.P.; CANDIDO, L. Assessment of regional rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. **Climate Dynamic**. V.21, p.459-475. 2003.

- MARENGO, JA; TOMASELLA, J AND UVO, CB Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru – **Journal of Geophysical Research**, vol. 103, n. D2 – p.1775-1783. 1998.
- MATHEUSSEN, B.; KIRSCHBAUM, R.; GOODMAN, I. A.; O'DONNELL, G. M.; LETTENMAIER, D. P. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia river basin (USA and Canada). **Hydrological Processes**. Vol 14 p. 867-885. 2000.
- MAURER, E.P. **Predictability of runoff in the Mississippi River Basin**. University of Washington, Seattle. Technical Report n.172, outubro. 2002. 97p.
- MAURER, E.P.; LETTENMAIER, D.P. Predictability of seasonal runoff in the Mississippi River Basin. **Journal of Geophysical Research**. V.108, n.16, p.2(1-13). 2003.
- MCGUFFIE, K. HENDERSON-SELLER, A. **A Climate Modelling Primer**. England: John Wiley & Sons. 253p. 1997
- MCGUFFIE, K. HENDERSON-SELLER, A. Forty Years of Numerical Climate Modelling. **International Journal of Climatology**. Vol.21, p1067-1109. 2001.
- MCLAUGHLIN, D. An integrated approach to hydrologic data assimilation: interpolation, smoothing and filtering. **Advances in Water Resources**. Vol.25, p.1275-1286. 2002.
- MINE, M.R.M. **Método Determinístico para Minimizar o Conflito entre Gerar Energia e Controlar Cheias**. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1998.
- MINE, M.R.M., TUCCI, C.E.M. Gerenciamento da Produção de Energia e Controle de Inundação: Foz do Areia no Rio Iguaçu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V.7, n.3, p.85-107. 2002.
- MIYAOKA, K.; MATSUYAMA, H.; OKI, T. Validation of the output from JMA-SiB Using the combined water balance method and a river routing scheme: A case study in the Mackenzie River basin. **Journal of Geophysical Research**. V.104, n.24, dez, p.31199-31206. 1999.
- MOORE, R.J.; BELL, V.A.; JONES, D.A. Forecasting for flood warning. **Comptes Rendus Geoscience**. Vol.337, p.203-217. 2005.

- MORETTIN, P.A.; TOLOI, C.M.C. **Análise de Séries Temporais**. Edgard Blücher: São Paulo. 2004. 535p.
- MORSE, A.P.; DOBLAS-REYES, R.J.; HOSHEN, M.B.; HAGEDORN, R.; PALMER, T.N. A forecast quality assessment of an end-to-end probabilistic multi-model seasonal forecast system using a malaria model. **Tellus**, Vol.57A, p.464-475. 2005.
- MYLNE, K.R. Decision-making from probability forecasts based on forecast value. **Meteorological Applications**. Vol.9, p.307-315. 2002.
- NEAL, E.G.; WALTER, M.T.; COFFEEN, C. Linking the pacific oscillation to seasonal stream discharge patterns in southeast Alaska. **Journal of Hydrology**. V.263, p.188-197.2002.
- NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D.P.; LIANG, X.; WETZEL, S.W.; WOOD E.F. Streamflow Simulation for Continental-scale River Basins. **Water Resources Research**. V.33, n.4, abr, p.711-724. 1997.
- O'DONNELL, G.M.; CZAJKOWSKI, K.P.; DUBAYAH, R.O.; LETTENMAIER, D.P. Macroscale hidrological modeling using remotely sensed inputs: Application to the Ohio River basin. **Journal of Geophysical Research**. V.105, n.10, mai, p.12499-12516. 2000.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Previsão de Vazões (Submódulo 9.5)**. Rio de Janeiro: ONS, jun, 11p. 2000.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Modelos Computacionais (Submódulo 18.2)**. Rio de Janeiro: ONS, jun, 26p. 2001a.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório Anual de Previsão de Vazões**. Rio de Janeiro: ONS, mar, 33p. 2001b.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano Anual de Prevenção de Cheias – Ciclo 2000/2001**. Rio de Janeiro: ONS, 110p. 2001c.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Reavaliação de Séries de Vazões Naturais – Bacia do São Francisco: Análise de Dados das Estações Fluviométricas e Pluviométricas**. São Paulo: Themag/Aquavia, 128p., 2003a.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Balço Hídrico de Reservatório de Sobradinho: caracterização do Problema, Definição de Ações**. Rio de Janeiro: ONS, 27p., 2003b.

- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Operação do Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: Julho, 2004.
- PALMER, T.N.; ALESSANDRI, A.; ANDERSEN, U. et al. Development of a European Multimodel Ensemble System for Seasonal-to-Interannual Prediction (DEMETER). **Bulletin of the American Meteorological Society**. Vol.85, p.853-872, junho. 2004.
- PIELKE, R.A.; CARBONE, R.E. Weather Impacts Forecasts, and Policy. **Bulletin of the American Meteorological Society**. Março, p.393-403. 2002.
- PINHEIRO, M.C. **Modelação Matemática do Escoamento e Caracterização Geométrica da Morfologia Fluvial: Subsídios para a Navegação e a Operação de Reservatórios**. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro. 221p., 2000.
- PINHEIRO, M.E. Modelos de Operação Hidráulica do Sistema Hidroenergético Brasileiro. In: BARROS, M.T.L. (Ed.) **Workshop Operação do Sistema Hidroenergético Brasileiro**. São Paulo: USP. p.26-31. 2001.
- PINTO, E.J.A. **Estudo de Indicadores Climáticos para a Previsão de Longo Termo de Vazões na Bacia do Alto São Francisco**. Belo Horizonte: UFMG. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). 180p. 2005.
- RAJAGOPALAN, B.; LALL, U. A k-nearest-neighbor simulator for daily precipitation and other weather variables. **Water Resources Research**. V.35, n.10, p.3089-3101. 1999.
- RAWLS, W.J.; AHUJA, L.R.; BRAKENSIEK, D.L.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement In: Maidment, D. **Handbook of hydrology**. McGraw-Hill New York. 1993.
- RICHARDSON, D.S. Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. **Quarterly Journal of Royal Meteorology Society**. V.126, p.649-667. 2000.
- ROADS, J.; CHEN, S.-C; KANAMITSU, M. U.S. regional climate simulations and seasonal forecasts. **Journal of Geophysical Research**. V.108, n.16, p.1(1-17). 2003.
- ROULSTON, M.S.; SMITH, L.A. The Boy Who Cried Wolf Revisited: The Impact of False Alarm Intolerance on Cost-Loss Scenarios. **Weather and Forecasting**. Vol.19, p.391-397, abril. 2004.

- SAMPAIO, G. **O El Niño e Você – O Fenômeno Climático**. São José dos Campos: TRANSTEC, 116p., 1999.
- SAMPAIO, G. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC. Cachoeira Paulista, SP, Janeiro de 2005. (**comunicação verbal**).
- SAMPAIO, G. MARENGO, J. A. Seasonal, interannual and long-term variability of the hydrometeorology of the Sao Francisco River Basin (Northeast Brazil),. **International Journal of Climatology** (submetido). 2003.
- SEUFFERT, G.; GROSS, P.; SIMMER, C.; WOOD, E.F. The Influence of Hydrologic Modeling on the Predicted Local Weather: Two-Way Coupling of a Mesoscale Weather Prediction Model and a Land Surface Hydrologic Model. **Journal of Hydrometeorology**. V.3, out, p.505-523. 2002.
- SHUKLA, J.; ANDERSON, J.; BAUMHEFNER, D.; BRANKOVIC, C.; CHANG, Y.; KALNAY, E.; MARX, L.; PALMER, T.; PAOLINO, D.; PLOSHAY, J.; SCHUBERT, S.; STRAUS, D.; SUAREZ, M.; TRIBBIA, J. Dynamical Seasonal Prediction. **Bulletin of the American Meteorological Society**. V.81, n.11, nov., p.2593-2606. 2000.
- SHUTTLEWORTH, W.J. Evaporation In: Maidment, D. R. Handbook of hydrology McGraw-Hill New York. 1993.
- SILVEIRA, C.A.C. **Previsão de Volumes de Espera em Tempo-Real para Usina Hidrelétrica de Sobradinho**. Dissertação de Mestrado, IPH/UFRGS, Porto Alegre. 1996. 129p.
- SILVERMAN, B.W. **Density Estimation for Statistics and Data Analysis**. New York (USA): Chapman and Hall. 175p. 1999.
- SINGH, V.P.; WOOLHISER, D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**. V.7, n.4, jul/ago, p.270-292. 2002.
- SMITH, M.B.; DONG-JUN, S.; KOREN, V.I.; REED, S.M.; ZHANG, Z.; DUAN, Q.; MOREDA, F.; CONG, S. **The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design**. Journal of Hydrology. Vol.298, p.4-26. 2004.
- SMITH, L.A.; ROULSTON, M.S.; VON HARDENBERG, J. **End to End Ensemble Forecasting: Towards Evaluating the Economic Value of the Ensemble Prediction System**. Oxford, U.K.: Pembroke College. Technical Memorandum, n.336, abr, 2001. 29p.

- SOUZA FILHO, F.A.; LALL, U. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceara, Brazil: Applications of a multivariate, semiparametric algorithm. **Water Resources Research**. V.39, n.11, p.1(1-13). 2003.
- STERN, P.C.; EASTERLING, W.E. (eds.) **Making Climate Forecasts Matter**. National Academic Press: National Research Council, Panel on the Human Dimensions of Seasonal-to-Interannual Climate Variability, EUA. 1999. 175p.
- STOCKDALE, T.N. An Overview of techniques for seasonal forecasting. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**. V.14, p.305-318. 2000.
- STEWART, T.R.; PIELKE, R.; NATH, R. Understanding User Decision Making and the Value of Improved Precipitation Forecasts – Lessons from a case study. **Bulletin of the American Meteorological Society**. Fevereiro, p.223-235. 2004.
- TAYLOR, J.W.; BUIZZA, R. **Using Weather Ensemble Predictions in Electricity Demand Forecasting**. Oxford, U.K.: Saïd Business School. Technical Memorandum, n. 312, set, 2000. 23p.
- TODINI, E. The Arno Rainfall – Runoff Model. **Journal of Hydrology**, Vol.175, pp. 293-338. 1996.
- TOTH, E.; MONTANARI, A.; BRATH A. Real-Time Flood Forecasting via Combined Use of Conceptual and Stochastic Models. **Physics and Chemistry of the Earth**. V.24, n.7, p.793-798. 1999.
- TROCH, P.A.; PANICONI, C.; MCLAUGHLIN, D. Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. **Advances in Water Resources**. V.26, p.131-135. 2003.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 669 p. 1998.
- TUCCI, C.E.M.; BRAGA, B. **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 348p., nov. 2003.
- TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; COLLISCHONN W.; DIAS, P.L.S.; SAMPAIO, G.O. Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin. **Water Resources Research**. V.39, n.7, p.3(1-11). 2003.

- TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W. Previsão de Vazão. In: TUCCI, C.E.M.; BRAGA, B. (Orgs.) **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, p.281-348, nov. 2003.
- VILLANUEVA, A.; ZAMANILLO, E.; TUCCI, C.E.M. Previsão de Vazão para Irrigação. VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais** Vol. 1, p.536-549. 1987.
- VÖRÖSMARTY, C. J.; WILLMOTT, C. J.; CHOUDHURY, B. J.; SCHLOSS, A. L.; STEARNS, T. K.; ROBESON, S. M.; DORMAN, T. Analyzing the discharge regime of a large tropical river trough remote sensing, ground-based climatic data and modeling. **Water Resources Research**, Vol.32, n.10, p.3137-3150. 1996
- WANG, Q.; TAKAHASHI, H. Regional hydrological effects of grassland degradation in the Loess Plateau of China **Hydrological Processes**. Vol.12, p.2279-2288. 1998.
- WERNSTEDT, K.; HERSH, R. Climate Forecasts in Flood Planning: Promise and Ambiguity. **Journal of the American Water Resources Association**. V.38, n.6, dez, p.1703-1713. 2002.
- WIGMOSTA M.S.; VAIL L.W. LETTENMAIER D.P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, l 30, nº 6, 1665-1679. 1994.
- WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Academic Press: EUA. 1995. 467p.
- WILKS, D.S. Smoothing forecast ensembles with fitted probability distributions. **Quarterly Journal of Royal Meteorology Society**. V.128, p.2821-2836. 2002.
- WMO – World Meteorological Organization. **Global Observing System**. Disponível em: <<http://www.wmo.ch>>. Acesso em: Junho, 2005.
- WOOD, A.W.; MAURER, E.P.; KUMAR, A.; LETTENMAIER, D.P. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. **Journal of Geophysical Research**. V.107, n.20, p.6(1-15). 2002.
- YAO, HUAXIA; TERAOKAWA, A. Distributed hydrological model for Fuji river basin. **Journal of Hydrologic Engineering**. V.4, n.2, p.108-116. 1999.
- YAPO, P.O.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, Vol. 204 pp. 83-97. 1998.

ZHU, Y.; TOTH, Z.; WOBUS, R.; RICHARDSON, D.; MYLNE, K. The Economic Value of Ensemble-Based Weather Forecasts. **Bulletin of the American Meteorological Society**. jan., p.73-83. 2002.

ANEXO A

APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

USINA	EMPRESA	POT. [MW]	RIO	UF	INICIO
Alto Fêmeas	COELBA	10,0	Fêmeas	BA	
B	Mineração Morro Velho Ltda.	0,9	Rio do Peixe	MG	29/5
Benfica	Cia Industrial. Itaunense	1,0	São João	MG	
Cajuru	CEMIG	7,2	Pará	MG	
Cel. Américo Teixeira	Companhia Industrial Belo Horizonte	5,6	Ribeirão do Riachinho	MG	
Cel. João de Cerqueira Lima	Cia Industrial. Itaunense	1,6	São João	MG	
Codorna	Mineração Morro Velho Ltda.	1,9	Ribeirão dos Marinheiros	MG	
D (Duas Turbinas)	Mineração Morro Velho Ltda.	1,4	Rio do Peixe	MG	25/3
Dorneles	FERLIG-Ferro Liga Ltda	1,2	Pará	MG	
Dr. Augusto Gonçalves Mascarenhas	Cia Industrial. Itaunense	1,6	São João	MG	
Dr.Silvino M.dos Santos (Carioca)	Cia Tecidos Santanense	1,7	São João	MG	
E	Mineração Morro Velho Ltda.	1,4	Capitão do Mato	MG	19/4
E Nova	Mineração Morro Velho Ltda.	2,8	Córrego Capitão do Mato	MG	19/4
F (Duas Turbinas)	Mineração Morro Velho Ltda.	3,8	Córrego Capitão do Mato	MG	16/4
G	Mineração Morro Velho Ltda.	1,4	Córrego Capitão do Mato	MG	7/6
Gafanhoto*	CEMIG	12,9	Pará	MG	1946
Itaparica (Luiz Gonzaga)	CHESF	1500,0	São Francisco	PE	1985
João de Deus	Cia Industrial Aliança Bondespachense	1,6	Lambari	MG	
Marzagão	Fertiligas Indústria e Comércio Ltda.	0,9	Arrudas	MG	
Moxoto (Apolonio Sales)	CHESF	440,0	São Francisco	AL	1978
Pacífico Mascareñas	Companhia Fiação Tecidos Cedro Cachoeira	2,9	Parauninha	MG	
Pandeiros	CEMIG	4,2	Pandeiros	MG	
Parauna	CEMIG	4,3	Parauna	MG	06/1927
Paulo Afonso I	CHESF	180,0	São Francisco	BA	1955
Paulo Afonso II	CHESF	480,0	São Francisco	BA	1961
Paulo Afonso III	CHESF	864,0	São Francisco	BA	1971
Paulo Afonso IV	CHESF	2460,0	São Francisco	BA	1979
Piloto	CHESF	2,0	São Francisco	BA	
Presidente Goulart (Correntina)	COELBA	8,0	Correntina	BA	
Queimado	CEB, CEMIG	105,0	Preto	MG	
Rieger	Rieger Agropecuária Ltda	5,4	Fêmeas	BA	
Rio de Pedras	CEMIG	9,3	Das Velhas	MG	
Santa Cruz	- (Nenhuma)	4,0	Rio da Pedras	BA	
Sobradinho	CHESF	1050,0	São Francisco	BA	1979
Três Marias	CEMIG	396,0	São Francisco	MG	1962
Xingo	CHESF	3000,0	São Francisco	SE	12/1994

ANEXO B

ESTRUTURA DO MODELO MGB-IPH

A estrutura do modelo MGB-IPH é semelhante à estrutura dos modelos LARSIM, apresentado por Bremicker (1998), e VIC-2L (Wigmosta et al., 1994; Liang et al., 1994; Nijssen et al., 1997) com algumas adaptações. O módulo de balanço de água no solo original do modelo LARSIM foi simplificado, o módulo de evapotranspiração foi desenvolvido de acordo com os textos de Shuttleworth (1993) e Wigmosta et al. (1994), e a metodologia de Muskingun-Cunge, na forma descrita por Tucci (1998), foi utilizada no módulo de escoamento na rede de drenagem.

O modelo é composto dos seguintes algoritmos: Balanço de água no solo; Evapotranspiração; Escoamentos: superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; Escoamento na rede de drenagem.

A bacia é sub-dividida em células quadradas ligadas entre si (Figura B.1) por canais de drenagem. Cada célula está dividida em blocos de uso do solo (Figura B.2), sem considerar a localização dentro da célula. As células são, normalmente, de cerca de 10 x 10 km, podendo ser menores no caso de bacias relativamente pequenas.

O número de blocos de uso é escolhido de acordo com o número de grupos resultantes da combinação das características de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo. Um bloco é caracterizado por uma série de parâmetros, como o armazenamento máximo no solo e o índice de área foliar (IAF) da vegetação.

Os dois primeiros algoritmos ou módulos do modelo (balanço de água no solo e evapotranspiração) ocorrem em cada bloco de cada célula, o terceiro módulo (escoamento na célula) é o processo horizontal de fluxo no interior da célula até a rede de drenagem e o quarto módulo é o processo horizontal de fluxo ao longo da rede de drenagem.

As variáveis: precipitação, temperatura, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica em uma célula são obtidas por interpolação dos postos com dados mais próximos. Normalmente a função de interpolação utilizada é baseada na ponderação pelo inverso da distância ao quadrado.

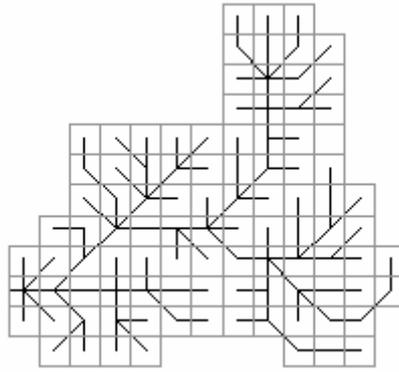


Figura B.1: Bacia hidrográfica dividida em células quadradas ligadas por linhas representando a rede de drenagem

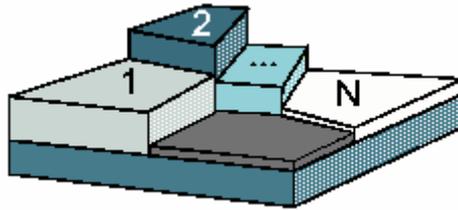


Figura B.2: Célula do modelo dividida em N blocos de uso, tipo e cobertura do solo

Balanço de água no solo

O balanço hídrico no solo é realizado de maneira independente para cada bloco de uso, utilizando as características e os parâmetros do bloco. A Figura B.3 e a Equação B.1 descrevem o balanço na camada de solo.

$$W_2 = W + P - T - D_{SUP} - D_{INT} - D_{BAS} + D_{cap} \quad (B.1)$$

onde: W_2 [mm] é o armazenamento na camada de solo ao final do intervalo de tempo; W [mm] é o armazenamento na camada de solo ao início do intervalo de tempo; P [mm] é a precipitação incidente (PI) menos a interceptação (I) ao longo do intervalo de tempo; T [mm] é a evapotranspiração da água da camada de solo ao longo do intervalo de tempo; D_{SUP} [mm] é o escoamento superficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem rápida); D_{INT} [mm] é o escoamento sub-superficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem lenta); D_{BAS} [mm] é o escoamento subterrâneo ao longo do intervalo de tempo (drenagem muito lenta); D_{cap} [mm] é o fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo. O intervalo de tempo considerado é de 1 dia.

A camada de solo do bloco recebe a precipitação descontada da interceptação, que depende do tipo de cobertura vegetal. Uma fração da precipitação, que depende do estado de armazenamento de água na camada de solo (W), e do armazenamento máximo na camada de solo (W_m), é imediatamente transformada em escoamento superficial (D_{SUP}). Além do escoamento superficial, o solo é drenado pelo escoamento subterrâneo (D_{BAS}), pelo escoamento sub-superficial (D_{INT}), e sofre a demanda de transpiração. A transpiração e a evaporação direta da água interceptada somadas, definem a evapotranspiração total (E). Em algumas situações a camada de solo pode receber um fluxo de umidade ascendente denominado D_{CAP} .

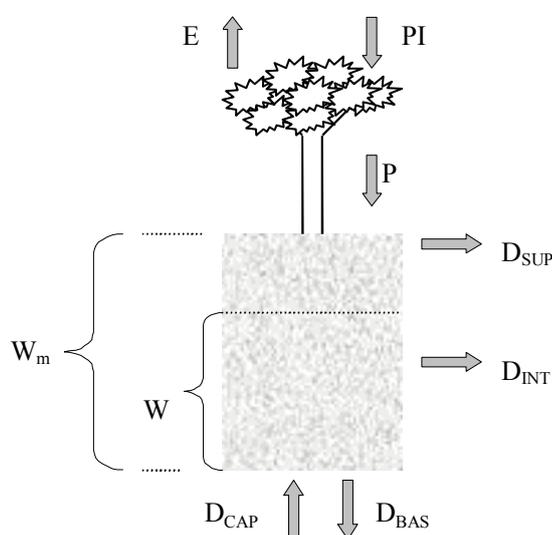


Figura B.3: Esquema do balanço de água vertical na camada de solo

O chamado “escoamento superficial”, é, na realidade, um escoamento rápido, ou direto. Neste caso, a palavra “superficial” é utilizada para designar o escoamento que chega rapidamente à rede de drenagem. O termo D_{SUP} , que representa o escoamento superficial, é calculado considerando que toda a chuva que cair sobre uma porção de solo já saturada de umidade irá gerar escoamento superficial. O modelo considera que existe uma relação entre W , que é o estado de armazenamento atual da camada de solo, e a porcentagem de área saturada. Os detalhes desta relação, dos conceitos resultantes e da formulação das equações foram apresentados por Todini (1996).

O escoamento superficial, ou direto, é calculado por:

$$D_{SUP} = P - (W_m - W) \quad (B.2)$$

quando $\delta \leq 0$ e por

$$D_{SUP} = P - (W_m - W) + W_m \cdot (\delta)^{b+1} \quad (B.3)$$

quando $\delta > 0$

onde

$$\delta = \left[\left(1 - \frac{W}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(b+1) \cdot W_m} \right]$$

e W [mm] é o armazenamento na camada do solo; W_m [mm] é o armazenamento máximo na camada do solo; b [-] é um parâmetro adimensional que representa a não-uniformidade da capacidade de armazenamento do solo no bloco; P [mm] é a precipitação menos a interceptação e D_{SUP} [mm] é o escoamento superficial (drenagem rápida).

O escoamento sub-superficial é obtido por uma relação não linear com o armazenamento na camada de solo (Equação B.4), baseada na equação da condutividade hidráulica do solo de Brooks e Corey (Rawls et al., 1993).

$$D_{INT} = K_{INT} \cdot \left(\frac{W - W_z}{W_m - W_z} \right)^{(3+2/XL)} \quad (B.4)$$

Nesta relação W_z [mm] é o limite de armazenamento para haver escoamento sub-superficial; K_{INT} [mm] é o parâmetro de escoamento sub-superficial; XL [-] é o índice de porosidade do solo (parâmetro) e D_{INT} [mm] é o escoamento sub-superficial. O parâmetro K_{INT} é calibrado e o índice XL é fixado em 0,4, que é uma média para diferentes tipos de solo (Rawls et al., 1993).

O escoamento subterrâneo é calculado por uma equação simples, linear com relação ao armazenamento no solo.

$$D_{BAS} = K_{BAS} \cdot \frac{(W - W_c)}{(W_m - W_c)} \quad (B.5)$$

onde W_c [mm] é o limite de armazenamento no solo para haver escoamento subterrâneo; K_{BAS} [mm] é o parâmetro de escoamento subterrâneo e D_{BAS} [mm] é o escoamento subterrâneo.

Quando W é menor do que W_z , não há escoamento sub-superficial, e quando W é menor do que W_c , não há escoamento subterrâneo. Normalmente W_z e W_c são fixados em um décimo de W_m , para evitar a possibilidade de escoamento negativo, e não são considerados na calibração.

Em alguns casos, quando o armazenamento do solo é baixo, pode ocorrer a transferência de água do reservatório subterrâneo para a camada de solo. Esta possibilidade

visa permitir ao modelo simular situações em que as águas subterrâneas voltem a ser disponibilizadas para a evapotranspiração. A Equação B.6 descreve o fluxo ascendente.

$$D_{cap} = \frac{W_c - W}{W_c} \cdot DM_{cap} \quad (B.6)$$

onde: W_c [mm] é o limite de armazenamento para haver fluxo ascendente; D_{cap} [mm] fluxo ascendente e DM_{cap} [mm] máximo fluxo ascendente para o solo (parâmetro do modelo).

Evapotranspiração

O modelo calcula a evaporação e transpiração pela equação de Penman – Monteith, de modo semelhante ao utilizado por Wigmosta et al. (1994). A equação de Penman – Monteith é:

$$e = \left(\frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w} \quad (B.7)$$

onde: e [$m \cdot s^{-1}$] taxa de evaporação da água; λ [$MJ \cdot kg^{-1}$] calor latente de vaporização; Δ [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$] taxa de variação da pressão de saturação do vapor; R_L [$MJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] radiação líquida na superfície; G [$MJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] fluxo de energia para o solo; ρ_A [$kg \cdot m^{-3}$] massa específica do ar; ρ_w [$kg \cdot m^{-3}$] massa específica da água; c_p [$MJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$] calor específico do ar úmido; e_s [kPa] pressão de saturação do vapor; e_d [kPa] pressão do vapor; γ [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$] constante psicrométrica; r_s [$s \cdot m^{-1}$] resistência superficial da vegetação; r_a [$s \cdot m^{-1}$] resistência aerodinâmica.

A energia disponível para a evapotranspiração é utilizada, primeiramente, para evaporar a água interceptada, armazenada sobre as folhas, caules e ramos da vegetação e diretamente sobre o solo. Caso ainda haja energia disponível ao final da etapa da evaporação, esta energia vai atender a transpiração.

A evaporação potencial (E_{IP}) da lâmina interceptada é calculada considerando que a resistência superficial (r_s) é nula. A evaporação real da lâmina interceptada é igual à potencial, caso a lâmina interceptada seja maior do que a evaporação potencial, caso contrário, a evaporação real é igual à lamina interceptada.

A interceptação é considerada dependente da cobertura do solo, expressa pelo índice de área foliar (IAF) da vegetação. O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo, e pode ser medido. O valor do IAF depende da vegetação, e valores típicos vão de 1,0 ou menos para vegetação rasteira, até 6,0 ou mais para florestas, conforme a Tabela B.1.

Em culturas agrícolas o IAF varia ao longo do ano, entre valores próximos a zero na época de preparação do plantio, até valores máximos no momento de máximo desenvolvimento das plantas. Em florestas decíduais e no cerrado o IAF também varia conforme a época do ano. Esta variabilidade é considerada no modelo utilizando valores mensais do IAF para cada bloco.

A Equação B.8 expressa a relação entre a capacidade de interceptação e o IAF.

$$S_{IL} = F_i \cdot IAF \quad (B.8)$$

onde S_{IL} [mm] é a capacidade do reservatório de interceptação; IAF [-] é o índice de área foliar (adimensional) e F_i [mm] é o parâmetro de lâmina máxima de interceptação. O valor de F_i é fixado em 0,2 mm, conforme Wigmosta et al. (1994).

Durante períodos de estiagem mais longos, a umidade do solo vai sendo retirada por transpiração e, à medida que o solo vai perdendo umidade, ocorre o *stress* hídrico, isto é, a transpiração diminui, mas a redução não ocorre imediatamente. Para valores de umidade do solo entre a capacidade de campo e um limite, que vai de 50 a 80% da capacidade de campo, a evapotranspiração não é afetada pela umidade do solo. A partir deste limite a evapotranspiração é diminuída, atingindo o mínimo – normalmente zero – no ponto de murcha (Shuttleworth, 1993).

Tabela B.1: IAF de coberturas vegetais

<i>Tipo de cobertura</i>	<i>IAF</i>	<i>Fonte</i>
Coníferas	6	Bremicker (1998)
Soja irrigada	7,5*	Fontana et al. (1992)
Soja não irrigada	6,0*	Fontana et al. (1992)
Arroz de sequeiro	6,0*	Oliveira e Machado (1999)
Floresta amazônica	6 a 9,6*	Honzák et al. (1996)
Pastagem amazônica (estiagem)	0,5	Roberts et al. (1996)
Pastagem amazônica (época úmida)	3,9	Roberts et al. (1996)
Savana Africana (região semi-árida –Sahel)	1,4*	Kabat et al. (1997)
Cerrado (estiagem)	0,4	Miranda et al. (1996)
Cerrado (época úmida)	1,0	Miranda et al. (1996)

* valor máximo durante o ciclo anual

A transpiração é calculada considerando os valores de resistência superficial e resistência aerodinâmica, adequados para o tipo de cobertura vegetal. A resistência superficial depende da disponibilidade de água no solo. Em condições favoráveis, os valores de resistência superficial são mínimos. Nestas condições a resistência superficial estimada de alguns tipos de vegetação é apresentada na Tabela B.2.

Tabela B.2: Resistência superficial em condições de boa disponibilidade de água no solo de alguns tipos de vegetação.

Tipo	Resistência superficial sem déficit (s.m ⁻¹)
floresta	100
cerrado	100
grama	69
grama	71
savana africana	60 a 98
millet	154

De acordo com o modelo proposto por Wigmosta et al. (1994), esta diminuição da evapotranspiração com a redução da umidade do solo ocorre pelo aumento da resistência superficial. A resistência superficial original é alterada por um coeficiente de ajuste (F_4). O coeficiente é igual a 1, da saturação até um limite mínimo de armazenamento no solo (W_L), a partir do qual seu valor começa a aumentar.

$$r_{su} = F_4 \cdot r_s \quad (\text{B.9})$$

onde

$$\frac{1}{F_4} = \frac{W - W_{PM}}{W_L - W_{PM}} \quad \text{para } W \leq W_L$$

onde r_{su} [s.m⁻¹] é a resistência superficial considerando a umidade do solo; r_s [s.m⁻¹] é a resistência superficial em boas condições de umidade do solo; F_4 é um coeficiente de ajuste da resistência superficial; W [mm] é o armazenamento do solo; W_{PM} [mm] é o armazenamento do solo no ponto de murcha e W_L [mm] é o armazenamento em que inicia o efeito sobre a resistência superficial. Conforme Shuttleworth (1993), os valores de W_L e W_{PM} são fixados em 50% e 10% de W_m , respectivamente, e não são considerados na calibração.

A resistência aerodinâmica é calculada a partir da velocidade do vento e da rugosidade da cobertura vegetal, que está relacionada à altura média da vegetação. Os detalhes desta relação podem ser encontrados em Shuttleworth (1993).

Escoamento na célula

Os termos D_{SUP} , D_{INT} e D_{BAS} , referem-se ao escoamento que deixa a camada de solo, conforme mostra a Figura B.6. Este escoamento não atinge instantaneamente a rede de drenagem, mas sofre retardo e amortecimento ainda no interior da célula. Estes efeitos são representados no modelo pela passagem do escoamento por reservatórios lineares, conforme a Figura B.7. O escoamento superficial vai para o reservatório superficial, o escoamento sub-superficial vai para o reservatório sub-superficial e o escoamento subterrâneo vai para o reservatório subterrâneo. São nesses reservatórios que o escoamento dos diferentes blocos de uso e cobertura vegetal se encontram.

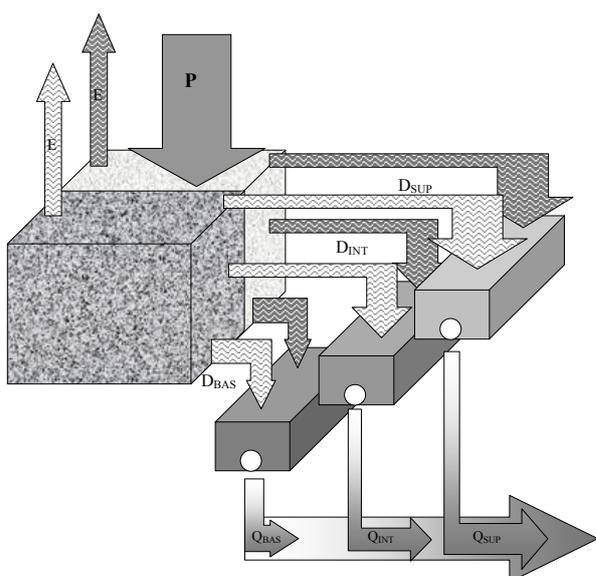


Figura B.7: Esquema de escoamento no interior de uma célula com dois blocos.

Cada um dos reservatórios é representado matematicamente por uma equação de reservatório linear simples. A soma dos valores de Q_{SUP} , Q_{INT} e Q_{BAS} é o escoamento da célula.

$$Q_{SUP} = \frac{1}{TK_S} \cdot V_{SUP} \quad (B.10)$$

$$Q_{INT} = \frac{1}{TK_I} \cdot V_{INT} \quad (B.11)$$

$$Q_{BAS} = \frac{1}{TK_B} \cdot V_{BAS} \quad (B.12)$$

onde Q_{SUP} [$m^3 \cdot s^{-1}$] é a vazão de saída do reservatório superficial; Q_{INT} [$m^3 \cdot s^{-1}$] é a vazão de saída do reservatório sub-superficial; Q_{BAS} [$m^3 \cdot s^{-1}$] é a vazão de saída do reservatório subterrâneo; V_{SUP} [m^3] é o volume no reservatório superficial; V_{INT} [m^3] é o volume no reservatório sub-superficial; V_{BAS} [m^3] é o volume no reservatório subterrâneo; TK_S [s] parâmetro de retardo do reservatório superficial; TK_I [s] parâmetro de retardo do reservatório sub-superficial; TK_B [s] parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo.

O valor do parâmetro TK_B pode ser obtido analisando os períodos de recessão do hidrograma e em alguns locais da bacia. As Equações B.13 e B.14 mostram como é obtido o valor de TK_B a partir de dados observados.

$$TK_B = C_B \cdot 86400 \quad (B.13)$$

$$C_B = \frac{ND}{\ln\left(\frac{Q_{ND}}{Q_0}\right)} \quad (B.14)$$

onde CB [dias] é o parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo; ND é o número de dias do período de recessão do hidrograma; Q_0 é a vazão no início da recessão e Q_{ND} é a vazão no final da recessão.

Os valores de TK_S e TK_I são obtidos considerando as características do relevo no interior da célula. A calibração é complementar a um processo de regionalização, proposto por Bremicker (1998), que relaciona os parâmetros de retardo às características do relevo no interior da célula. Para isto, é necessário contar com um modelo numérico do terreno com resolução espacial bastante inferior à resolução espacial do modelo hidrológico.

Nas aplicações apresentadas neste trabalho, a resolução do modelo hidrológico é de 10 x 10 km, enquanto a resolução dos modelos numéricos do terreno (MNT) é de 1 x 1 km ou 100 x 100 m. Para cada célula do modelo é calculado um tempo de retardo característico, que é corrigido durante a calibração por um coeficiente de ajuste adimensional. O tempo de retardo característico é obtido pela equação de Kirpich, utilizando a diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo do MNT encontrados dentro da célula do modelo considerada.

$$TK_S = C_S \cdot T_{ind} \quad (B.15)$$

$$TK_I = C_I \cdot T_{ind} \quad (B.16)$$

onde: T_{ind} [s] é o tempo de retardo característico da célula; C_s é um parâmetro adimensional para calibração do escoamento superficial e C_l é um parâmetro adimensional para calibração do escoamento sub-superficial.

$$T_{ind} = 3600 \cdot \left(0,868 \cdot \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad (B.17)$$

onde L [km] é a largura da célula e ΔH [m] é a diferença de altura entre os extremos mais alto e mais baixo da célula.

Os tempos de retardo do escoamento no interior da célula nada têm a ver com a propagação ao longo da célula. As equações B.10 a B.17 servem para calcular a propagação do escoamento gerado no interior da célula. A propagação através dos principais rios é realizada de forma independente como se descreve a seguir.

Escoamento na rede de drenagem

O modelo realiza a propagação nos trechos de rio utilizando o método de Muskingum-Cunge (Tucci, 1998), que relaciona a vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo qualquer, às vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e à vazão de entrada no intervalo atual.

Os parâmetros do modelo Muskingum-Cunge são calculados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média dos trechos de rio. O comprimento e a declividade são obtidos de mapas topográficos. A largura é obtida com base em uma relação com a área de drenagem válida para a bacia e a rugosidade é estimada com base em observações locais, fotografias e informações sobre material do leito.

O intervalo de tempo diário utilizado no modelo é sub-dividido em intervalos menores durante a propagação por Muskingum-Cunge na rede de drenagem, considerando o intervalo de tempo ideal para a propagação apresentar precisão no tempo viagem e no amortecimento do hidrograma, conforme descrito em Tucci (1998).

Atualização das variáveis de estado

A utilização do modelo MGB-IPH para previsão de vazões em tempo real exige a incorporação de valores observados de variáveis em tempo real, de forma a minimizar os erros iniciais na previsão. A metodologia de atualização utilizada no MGB-IPH utiliza os valores observados de vazão em diferentes locais ao longo da bacia para corrigir os valores calculados, de forma a corrigir as condições iniciais para a próxima etapa de previsão.

A técnica de atualização desenvolvida para o modelo distribuído está baseada na utilização de dados medidos nos rios (disponíveis em tempo real nos postos telemétricos). Os valores de vazão calculados pelo modelo, com antecedência de zero hora, são comparados com os valores de vazão observada em cada um dos postos, gerando um fator de correção de atualização (FCA) conforme a equação a seguir:

$$FCA = \frac{Q_{obs}}{Q_{calc}} \quad (B.18)$$

onde FCA é o fator de correção; Q_{obs} é a vazão observada e Q_{calc} é a vazão calculada.

A seguir, a vazão dos rios, em todas as células a montante da célula correspondente ao posto fluviométrico, é corrigida por este mesmo fator de correção, utilizando a Equação B.19:

$$Q_{atual} = FCA \cdot Q_{calc} \cdot \left(\frac{A_i}{A_p} \right) + Q_{calc} \cdot \left(1 - \frac{A_i}{A_p} \right) \quad (B.19)$$

onde, Q_{atual} é a vazão atualizada; A_i é a área a montante da célula considerada; e A_p é a área de drenagem no posto fluviométrico onde é observada a vazão Q_{obs} .

Durante as estiagens também é realizada a atualização dos volumes armazenados nos reservatórios que representam os aquíferos (reservatório subterrâneo de cada célula). Esta atualização está baseada no mesmo fator de correção, e é aplicada considerando um ponderador, conforme a equação:

$$VB_a = FCA \cdot VB_c \cdot (PB_i) + VB_c \cdot (1 - PB_i) \quad (B.20)$$

Nesta equação VB_a é o volume no reservatório subterrâneo atualizado; VB_c é o volume calculado; e PB_i é a parcela da vazão na célula i que é oriunda do escoamento subterrâneo. Esta última variável é calculada continuamente pelo modelo hidrológico, conforme descrito em Collischonn e Tucci, 2001

Calibração dos parâmetros

A calibração de um modelo hidrológico distribuído é, muitas vezes, citada como a etapa mais trabalhosa da utilização de um modelo deste tipo. Entretanto, ao longo das experiências anteriores no uso do modelo MGB-IPH, foi desenvolvida uma eficiente metodologia de calibração baseada em dois pontos principais: 1) relação direta entre os parâmetros e as classes de solos e de vegetação identificadas em mapas e imagens de satélite (Collischonn, 2001); e 2) otimização dos parâmetros para cada classe utilizando um programa

computacional baseado em algoritmos genéticos (Yapo et al., 1998; Collischonn, 2001; Collischonn e Tucci, 2003).

O algoritmo de otimização utilizado para a calibração dos parâmetros é o algoritmo MOCOM-UA, desenvolvido na Universidade do Arizona (Yapo et al., 1998). Trata-se de um algoritmo de otimização multi-objetivo que permite calibrar o modelo considerando diferentes aspectos do ajuste entre hidrogramas observado e calculado (Collischonn e Tucci, 2003). Tipicamente são utilizadas duas ou três funções objetivo, como o coeficiente de Nash Sutcliffe e os erros relativos de volumes calculados.

PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO MGB PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Bacia 1

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	120.20	0.82	0.05	46.17	0.67	0.00	0.05
floresta	677.60	0.16	1.96	92.34	0.67	0.00	0.05
irrigacao	534.00	0.25	1.31	76.95	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	356.50	0.25	1.96	92.34	0.67	0.00	0.05
pastage-li	305.10	0.49	0.82	46.17	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1457.60	0.16	1.96	92.34	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	636.50	0.49	1.82	46.17	0.67	0.00	0.05
caat-sp	524.00	0.66	0.82	46.17	0.67	0.00	0.05
caat-li	279.90	0.82	0.49	46.17	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	46.17	0.67	0.50	0.50
CS	39.46						
CI	353.10						
CB	4800.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 2

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	126.20	0.91	0.04	23.70	0.67	0.00	0.05
floresta	1379.00	0.18	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
irrigacao	910.80	0.27	1.28	39.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	1043.00	0.36	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
pastage-li	453.50	0.54	1.02	39.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1999.00	0.36	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1025.60	0.54	1.02	39.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	498.50	0.72	0.64	23.70	0.67	0.00	0.05
caat-li	303.00	0.91	0.38	23.70	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	39.96						
CI	100.20						
CB	6300.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 3

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	126.20	0.91	0.04	23.70	0.67	0.00	0.05
floresta	1379.00	0.18	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
irrigacao	910.80	0.27	1.28	39.50	0.67	0.00	0.05

pastage-sp	1043.00	0.36	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
pastage-li	453.50	0.54	1.02	39.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1999.00	0.36	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1025.60	0.54	1.02	39.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	498.50	0.72	0.64	23.70	0.67	0.00	0.05
caat-li	303.00	0.91	0.38	23.70	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	39.96						
CI	100.20						
CB	3600.00						
QB_M3/SKM2	0.01						
BACIA 4							
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	167.72	1.51	0.02	16.23	0.67	0.00	0.05
floresta	1547.24	0.30	0.97	33.29	0.67	0.00	0.05
irrigacao	1274.21	0.45	0.65	27.06	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	1500.00	0.60	0.67	33.29	0.67	0.00	0.05
pastage-li	500.00	0.90	0.52	27.06	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	3500.00	0.60	0.67	33.29	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1000.00	0.90	0.52	27.06	0.67	0.00	0.05
caat-sp	499.50	1.20	0.33	16.23	0.67	0.00	0.05
caat-li	302.09	1.51	0.19	16.23	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	20.70						
CI	125.75						
CB	4000.00						
QB_M3/SKM2	0.01						
BACIA 5							
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	126.20	0.91	0.04	23.70	0.67	0.00	0.05
floresta	1379.00	0.18	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
irrigacao	910.80	0.27	1.28	39.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	1043.00	0.36	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
pastage-li	453.50	0.54	1.02	39.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1999.00	0.36	1.91	63.20	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1025.60	0.54	1.02	39.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	498.50	0.72	0.64	23.70	0.67	0.00	0.05
caat-li	303.00	0.91	0.38	23.70	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	39.96						
CI	100.20						
CB	4000.00						
QB_M3/SKM2	0.01						
BACIA 6							
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	231.32	0.90	0.04	20.12	0.67	0.00	0.05
floresta	2719.39	0.18	1.72	53.66	0.67	0.00	0.05
irrigacao	989.13	0.27	1.15	33.54	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	846.92	0.36	1.72	53.66	0.67	0.00	0.05
pastage-li	473.91	0.54	0.92	33.54	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	2476.76	0.36	1.72	53.66	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1071.75	0.54	0.92	33.54	0.67	0.00	0.05
caat-sp	509.97	0.71	0.58	20.12	0.67	0.00	0.05
caat-li	279.37	0.90	0.34	20.12	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	28.57						
CI	102.71						
CB	5700.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 7

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	155.10	1.29	0.03	30.43	0.67	0.00	0.05
floresta	1470.01	0.26	1.47	81.15	0.67	0.00	0.05
irrigacao	853.42	0.38	0.98	50.72	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	766.61	0.51	1.47	81.15	0.67	0.00	0.05
pastage-li	261.67	0.77	0.78	50.72	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1771.11	0.51	1.47	81.15	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	533.31	0.77	0.78	50.72	0.67	0.00	0.05
caat-sp	504.98	1.02	0.49	30.43	0.67	0.00	0.05
caat-li	286.34	1.29	0.29	30.43	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	28.05						
CI	99.20						
CB	3400.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 8

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	155.10	1.29	0.03	30.43	0.67	0.00	0.05
floresta	1470.01	0.26	0.70	51.15	0.67	0.00	0.05
irrigacao	1853.42	0.38	0.70	30.72	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	2500.00	0.51	0.70	51.15	0.67	0.00	0.05
pastage-li	1200.00	0.77	0.28	20.72	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	3000.11	0.51	0.70	51.15	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1533.31	0.77	0.28	20.72	0.67	0.00	0.05
caat-sp	504.98	1.02	0.49	30.43	0.67	0.00	0.05
caat-li	286.34	1.29	0.29	30.43	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	20.05						
CI	99.20						
CB	4000.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 9

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	214.20	0.88	0.05	25.91	0.67	0.00	0.05
floresta	2067.47	0.18	2.08	69.11	0.67	0.00	0.05
irrigacao	967.37	0.26	1.39	43.20	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	980.73	0.35	2.08	69.11	0.67	0.00	0.05
pastage-li	242.64	0.53	1.12	43.20	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	2717.01	0.35	2.08	69.11	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1242.16	0.53	1.12	43.20	0.67	0.00	0.05
caat-sp	518.13	0.69	0.70	25.91	0.67	0.00	0.05
caat-li	289.15	0.88	0.41	25.91	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	17.40						
CI	76.62						
CB	3000.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 10

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	308.35	0.63	0.02	34.10	0.67	0.00	0.05
floresta	2088.49	0.13	1.04	90.95	0.67	0.00	0.05
irrigacao	872.41	0.19	0.69	56.85	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	1954.04	0.25	1.04	90.95	0.67	0.00	0.05
pastage-li	376.76	0.38	0.55	56.85	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	2595.64	0.25	1.04	90.95	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	689.14	0.38	0.55	56.85	0.67	0.00	0.05

caat-sp	513.54	0.50	0.35	34.10	0.67	0.00	0.05
caat-li	289.15	0.63	0.21	34.10	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	56.14						
CI	70.07						
CB	3900.00						
QB_M3/SKM2	0.005						

BACIA 11

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	241.62	1.49	0.05	49.72	0.67	0.00	0.05
floresta	2411.03	0.30	2.11	132.62	0.67	0.00	0.05
irrigacao	1269.19	0.44	1.41	82.90	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	561.96	0.59	2.11	132.62	0.67	0.00	0.05
pastage-li	140.00	0.90	1.14	82.90	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1382.96	0.59	2.11	132.62	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1038.45	0.90	1.14	82.90	0.67	0.00	0.05
caat-sp	518.65	1.17	0.71	49.72	0.67	0.00	0.05
caat-li	283.95	1.49	0.42	49.72	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	16.06						
CI	58.92						
CB	3900.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 12

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	251.47	1.05	0.05	49.75	0.67	0.00	0.05
floresta	2530.58	0.21	2.01	132.69	0.67	0.00	0.05
irrigacao	1107.64	0.31	1.34	82.94	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	913.06	0.42	2.01	132.69	0.67	0.00	0.05
pastage-li	222.99	0.63	1.08	82.94	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	2551.27	0.42	2.01	132.69	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1363.89	0.63	1.08	82.94	0.67	0.00	0.05
caat-sp	539.89	0.82	0.68	49.75	0.67	0.00	0.05
caat-li	300.14	1.05	0.40	49.75	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	25.58						
CI	71.18						
CB	2000.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 13

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	155.10	1.29	0.03	30.43	0.67	0.00	0.05
floresta	1470.01	0.26	0.70	51.15	0.67	0.00	0.05
irrigacao	1853.42	0.38	0.70	30.72	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	2500.00	0.51	0.70	51.15	0.67	0.00	0.05
pastage-li	1200.00	0.77	0.28	20.72	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	3000.11	0.51	0.70	51.15	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1533.31	0.77	0.28	20.72	0.67	0.00	0.05
caat-sp	504.98	1.02	0.49	30.43	0.67	0.00	0.05
caat-li	286.34	1.29	0.29	30.43	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50
CS	20.05						
CI	99.20						
CB	4000.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 14

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
-----	----	---	------	------	----	-----	----

rocha	248.17	0.07	0.04	2.57	0.67	0.00	0.05
floresta	3314.00	0.07	0.04	8.58	0.67	0.00	0.05
irrigacao	934.40	0.04	0.04	2.57	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	917.60	0.01	0.06	8.58	0.67	0.00	0.05
pastage-li	421.20	0.06	0.02	2.57	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1742.40	0.01	0.06	8.58	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1102.40	0.06	0.02	2.57	0.67	0.00	0.05
caat-sp	589.00	0.01	0.04	6.00	0.67	0.00	0.05
caat-li	327.00	0.06	0.02	2.57	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.02	0.04	2.57	0.67	0.50	0.50
CS	77.16						
CI	83.10						
CB	1100.00						
QB_M3/SKM2	0.005						

BACIA 15

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	686.00	1.23	1.70	25.08	0.67	0.00	0.05
floresta	3956.20	0.24	1.70	25.08	0.67	0.00	0.05
irrigacao	2910.07	0.37	3.87	39.48	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	2356.71	0.48	3.87	39.48	0.67	0.00	0.05
pastage-li	197.00	0.75	1.70	25.08	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	2884.81	0.48	3.87	39.48	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	474.71	0.75	1.70	25.08	0.67	0.00	0.05
caat-sp	2190.63	0.97	2.78	25.08	0.67	0.00	0.05
caat-li	1451.66	1.23	1.70	22.68	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.33	1.56	22.68	0.67	0.50	0.50
CS	45.10						
CI	325.00						
CB	7500.00						
QB_M3/SKM2	0.006						

BACIA 16

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	248.17	0.07	0.04	2.57	0.67	0.00	0.05
floresta	3314.00	0.07	0.04	8.58	0.67	0.00	0.05
irrigacao	934.40	0.04	0.04	2.57	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	917.60	0.01	0.06	8.58	0.67	0.00	0.05
pastage-li	421.20	0.06	0.02	2.57	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1742.40	0.01	0.06	8.58	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1102.40	0.06	0.02	2.57	0.67	0.00	0.05
caat-sp	589.00	0.01	0.04	6.00	0.67	0.00	0.05
caat-li	327.00	0.06	0.02	2.57	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.02	0.04	2.57	0.67	0.50	0.50
CS	77.16						
CI	83.10						
CB	4000.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 17

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	164.72	0.56	0.13	113.99	0.67	0.00	0.05
floresta	4339.47	0.11	2.99	191.61	0.67	0.00	0.05
irrigacao	3540.03	0.17	2.99	115.08	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	7885.00	0.22	2.99	191.61	0.67	0.00	0.05
pastage-li	3212.40	0.34	1.20	77.62	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	6711.25	0.22	2.99	191.61	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	2571.36	0.34	1.20	77.62	0.67	0.00	0.05
caat-sp	1440.98	0.44	2.09	113.99	0.67	0.00	0.05
caat-li	545.48	0.56	1.24	113.99	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.10	0.80	30.00	0.67	0.50	0.50

CS 40.60
 CI 240.26
 CB 7500.00
 QB_M3/SKM2 0.002

BACIA 18

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	2400.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
floresta	3366.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
irrigacao	3733.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	3530.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
pastage-li	1404.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	3431.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1478.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	2090.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
caat-li	571.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.12	0.01	0.50	0.67	0.50	0.50
CS	174.70						
CI	994.00						
CB	4000.00						
QB_M3/SKM2	0.002						

BACIA 19

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	875.25	0.14	0.49	19.68	0.67	0.00	0.05
floresta	4202.40	0.04	0.49	19.68	0.67	0.00	0.05
irrigacao	3346.02	0.05	1.01	46.82	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	6770.00	0.08	1.01	46.82	0.67	0.00	0.05
pastage-li	822.89	0.14	0.49	19.68	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	4649.72	0.08	1.01	46.82	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	614.30	0.14	0.49	19.68	0.67	0.00	0.05
caat-sp	3469.86	0.14	0.92	33.25	0.67	0.00	0.05
caat-li	796.59	0.18	0.49	19.68	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.18	1.56	22.68	0.67	0.50	0.50
CS	68.22						
CI	334.11						
CB	18200.00						
QB_M3/SKM2	0.002						

BACIA 20

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	798.23	0.09	0.63	5.92	0.67	0.00	0.05
floresta	1815.44	0.03	0.63	5.92	0.67	0.00	0.05
irrigacao	1803.50	0.03	1.29	14.09	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	6032.07	0.05	1.29	14.09	0.67	0.00	0.05
pastage-li	827.83	0.09	0.63	5.92	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	4314.94	0.05	1.29	14.09	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	1018.51	0.09	0.63	5.92	0.67	0.00	0.05
caat-sp	2415.02	0.09	1.17	10.01	0.67	0.00	0.05
caat-li	701.80	0.12	0.63	5.92	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.12	1.56	10.01	0.67	0.50	0.50
CS	90.05						
CI	527.56						
CB	20000.00						
QB_M3/SKM2	0.002						

BACIA 21

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	1386.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05
floresta	3366.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05
irrigacao	3733.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05

pastage-sp	2530.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05
pastage-li	404.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1431.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	3278.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	2590.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05
caat-li	871.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.12	0.01	2.50	0.67	0.50	0.50
CS	174.70						
CI	994.00						
CB	1500.00						
QB_M3/SKM2	0.001						
BACIA 22							
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	1870.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
floresta	7660.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
irrigacao	4954.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	131.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-li	108.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1477.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	278.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	391.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-li	74.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.50	0.50
CS	17.00						
CI	28.00						
CB	1500.00						
QB_M3/SKM2	0.001						
BACIA 23							
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	1870.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
floresta	7660.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
irrigacao	4954.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	131.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-li	108.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1477.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	278.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	391.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-li	74.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.50	0.50
CS	17.00						
CI	28.00						
CB	1500.00						
QB_M3/SKM2	0.001						
BACIA 24							
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	1870.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
floresta	7660.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
irrigacao	4954.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	131.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-li	108.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1477.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	278.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	391.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-li	74.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.50	0.50
CS	17.00						
CI	28.00						
CB	1500.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 25

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	1870.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
floresta	7660.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
irrigacao	4954.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	131.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-li	108.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1477.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	278.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	391.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-li	74.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.50	0.50
CS	17.00						
CI	28.00						
CB	1500.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 26

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	1870.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
floresta	7660.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
irrigacao	4954.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	131.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-li	108.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1477.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	278.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	391.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-li	74.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.50	0.50
CS	17.00						
CI	28.00						
CB	1500.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

BACIA 27

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
rocha	1870.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
floresta	7660.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
irrigacao	4954.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-sp	131.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
pastage-li	108.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-sp	1477.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
cerrado-li	278.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-sp	391.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
caat-li	74.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.00	0.05
agua	0.00	0.00	0.01	3.50	0.67	0.50	0.50
CS	17.00						
CI	28.00						
CB	1500.00						
QB_M3/SKM2	0.01						

ANEXO C

PARÂMETROS DO MODELO DE RESÍDUOS EM TRÊS MARIAS

1 Semana de Antecedência. Modelo: $E(t) = a1.E(t-1) + b1.P_{ETA}(t) + \xi(t)$

Obs.: Para as datas anteriores a 22/12/1998, os parâmetros são iguais a essa data, ou seja, $a1=0.10577$ e $b1=-10.348$

Data	a1	b1	Data	a1	b1	Data	a1	b1
22/12/1998	0.10577	-10.348	15/8/2000	0.09153	-11.523	9/4/2002	0.01709	-11.978
29/12/1998	0.09957	-9.769	22/8/2000	0.09190	-11.457	16/4/2002	0.01600	-11.994
5/1/1999	0.10197	-9.934	29/8/2000	0.08925	-11.555	23/4/2002	0.01584	-11.060
12/1/1999	0.09750	-10.185	5/9/2000	0.08937	-11.326	30/4/2002	0.01555	-11.983
19/1/1999	0.09611	-10.124	12/9/2000	0.08366	-11.152	7/5/2002	0.01526	-12.009
26/1/1999	0.10079	-9.893	19/9/2000	0.08444	-11.323	14/5/2002	0.01517	-12.006
2/2/1999	0.10216	-9.848	26/9/2000	0.08472	-11.915	21/5/2002	0.01517	-12.006
9/2/1999	0.09779	-9.951	3/10/2000	0.08784	-11.737	28/5/2002	0.01466	-12.000
16/2/1999	0.10260	-1.912	10/10/2000	0.09079	-10.794	4/6/2002	0.01302	-11.998
23/2/1999	0.07668	-9.320	17/10/2000	0.09114	-10.277	11/6/2002	0.01211	-12.001
2/3/1999	0.07314	-9.570	24/10/2000	0.08939	-13.533	18/6/2002	0.01144	-11.991
9/3/1999	0.08069	-9.668	31/10/2000	0.08442	-5.865	25/6/2002	0.01144	-11.991
16/3/1999	0.08300	-9.669	7/11/2000	0.08639	-11.019	2/7/2002	0.01144	-11.991
23/3/1999	0.07660	-9.599	14/11/2000	0.07682	-10.647	9/7/2002	0.01144	-11.976
30/3/1999	0.09265	-9.321	21/11/2000	0.07968	-10.151	16/7/2002	0.01159	-11.996
6/4/1999	0.08794	-9.409	28/11/2000	0.11132	-10.931	23/7/2002	0.01159	-11.996
13/4/1999	0.08820	-9.536	5/12/2000	0.08461	-7.677	30/7/2002	0.01137	-11.999
20/4/1999	0.08885	-9.562	12/12/2000	0.07386	-11.156	6/8/2002	0.01083	-12.007
27/4/1999	0.08862	-9.814	19/12/2000	0.07876	-11.118	13/8/2002	0.01065	-12.005
4/5/1999	0.08839	-9.501	26/12/2000	0.08050	-11.677	20/8/2002	0.01117	-11.998
11/5/1999	0.08871	-9.472	2/1/2001	0.07163	-11.658	27/8/2002	0.01140	-12.003
18/5/1999	0.08902	-9.515	9/1/2001	0.07165	-11.652	3/9/2002	0.01174	-11.857
25/5/1999	0.08904	-9.496	16/1/2001	0.07255	-11.738	10/9/2002	0.01143	-12.018
1/6/1999	0.08886	-9.460	23/1/2001	0.07211	-11.688	17/9/2002	0.01165	-5.093
8/6/1999	0.08902	-10.111	30/1/2001	0.06721	-11.191	24/9/2002	0.01142	-11.900
15/6/1999	0.09034	-9.459	6/2/2001	0.05190	-10.405	1/10/2002	0.01088	-15.617
22/6/1999	0.09105	-9.452	13/2/2001	0.06626	-10.543	8/10/2002	0.01217	-13.683
29/6/1999	0.09162	-9.453	20/2/2001	0.07482	-10.608	15/10/2002	0.01254	-11.571
6/7/1999	0.09174	-12.937	27/2/2001	0.08254	-11.072	22/10/2002	0.01213	-11.906
13/7/1999	0.09160	-5.322	6/3/2001	0.08264	-10.467	29/10/2002	0.01233	-11.141
20/7/1999	0.09106	-9.455	13/3/2001	0.08744	-14.845	5/11/2002	0.00382	-12.649
27/7/1999	0.09079	-9.415	20/3/2001	0.08820	-5.393	12/11/2002	-0.00171	-0.267
3/8/1999	0.08687	-8.242	27/3/2001	0.08315	-10.738	19/11/2002	-0.00417	-12.971
10/8/1999	0.08594	-9.585	3/4/2001	0.08479	-10.944	26/11/2002	0.00198	-13.722
17/8/1999	0.08619	-10.288	10/4/2001	0.08528	-10.753	3/12/2002	-0.00666	-13.718
24/8/1999	0.08788	-9.272	17/4/2001	0.08488	-11.065	10/12/2002	-0.00007	-12.485
31/8/1999	0.08788	-9.272	24/4/2001	0.08470	-10.782	17/12/2002	0.00280	-13.208
7/9/1999	0.08799	-9.480	1/5/2001	0.08565	-10.747	24/12/2002	0.00338	-14.321
14/9/1999	0.08909	-9.027	8/5/2001	0.08508	-10.805	31/12/2002	0.00420	-13.762
21/9/1999	0.08657	-0.218	15/5/2001	0.08471	-13.344	7/1/2003	0.01378	-13.121
28/9/1999	0.08894	-8.949	22/5/2001	0.08700	-10.941	14/1/2003	0.02932	-13.691
5/10/1999	0.08909	-6.755	29/5/2001	0.08590	-12.214	21/1/2003	0.03700	-16.913
12/10/1999	0.08890	-9.008	5/6/2001	0.08606	-10.963	28/1/2003	0.07286	-13.564
19/10/1999	0.07867	-11.573	12/6/2001	0.08601	-10.961	4/2/2003	0.05229	-13.983
26/10/1999	0.08089	-9.908	19/6/2001	0.08601	-10.961	11/2/2003	0.04884	-14.176

2/11/1999	0.08393	-9.514	26/6/2001	0.08609	-11.187	18/2/2003	0.04752	-14.493
9/11/1999	0.09460	-11.491	3/7/2001	0.08613	-10.955	25/2/2003	0.07466	-14.653
16/11/1999	0.08832	-11.390	10/7/2001	0.08613	-10.955	4/3/2003	0.09245	-14.371
23/11/1999	0.09646	-11.164	17/7/2001	0.08613	-10.955	11/3/2003	0.11477	-14.944
30/11/1999	0.09226	-11.895	24/7/2001	0.08613	-10.955	18/3/2003	0.14670	-15.126
7/12/1999	0.07716	-11.354	31/7/2001	0.08588	-10.962	25/3/2003	0.16340	-21.513
14/12/1999	0.13120	-8.363	7/8/2001	0.08667	-10.892	1/4/2003	0.16742	-14.353
21/12/1999	0.16012	-12.665	14/8/2001	0.08624	-10.954	8/4/2003	0.17579	-14.981
28/12/1999	0.10795	-13.925	21/8/2001	0.08558	-10.993	15/4/2003	0.17772	-14.959
4/1/2000	0.15336	-12.341	28/8/2001	0.08646	-12.319	22/4/2003	0.17793	-14.962
11/1/2000	0.14529	-12.286	4/9/2001	0.08573	-11.050	29/4/2003	0.17723	-14.959
18/1/2000	0.12621	-7.161	11/9/2001	0.08475	-10.325	6/5/2003	0.17806	-14.950
25/1/2000	0.09762	-13.059	18/9/2001	0.08510	-11.146	13/5/2003	0.17915	-14.943
1/2/2000	0.08633	-12.330	25/9/2001	0.08558	-12.077	20/5/2003	0.17890	-25.858
8/2/2000	0.02302	-12.336	2/10/2001	0.08261	-11.132	27/5/2003	0.17915	-21.139
15/2/2000	0.05505	-12.366	9/10/2001	0.08101	-11.275	3/6/2003	0.17870	-14.777
22/2/2000	0.06332	-13.217	16/10/2001	0.08732	-11.708	10/6/2003	0.17877	-14.943
29/2/2000	0.08932	-11.663	23/10/2001	0.08458	-11.839	17/6/2003	0.17903	-14.975
7/3/2000	0.09479	-11.406	30/10/2001	0.06934	-12.069	24/6/2003	0.17863	-2.908
14/3/2000	0.09502	-11.335	6/11/2001	0.07005	-12.226	1/7/2003	0.17865	-11.351
21/3/2000	0.09011	-11.633	13/11/2001	0.07306	-12.512	8/7/2003	0.17842	-14.942
28/3/2000	0.09038	-11.607	20/11/2001	0.06849	-12.410	15/7/2003	0.17850	-8.679
4/4/2000	0.09124	-14.294	27/11/2001	0.06692	-1.870	22/7/2003	0.17876	-14.935
11/4/2000	0.09132	-11.596	4/12/2001	0.06981	-12.553	29/7/2003	0.17853	-14.033
18/4/2000	0.09276	-11.578	11/12/2001	0.07162	-7.595	5/8/2003	0.17879	-14.936
25/4/2000	0.09081	-11.595	18/12/2001	0.08690	-11.381	12/8/2003	0.17840	-10.708
2/5/2000	0.09027	-11.596	25/12/2001	0.08229	-12.950	19/8/2003	0.18002	-14.908
9/5/2000	0.09233	-11.548	1/1/2002	0.07229	-12.712	26/8/2003	0.17914	-14.796
16/5/2000	0.09408	-11.531	8/1/2002	0.07548	-10.028	2/9/2003	0.18297	-14.873
23/5/2000	0.09533	-11.485	15/1/2002	0.08261	-11.874	9/9/2003	0.18174	-14.898
30/5/2000	0.09512	-6.964	22/1/2002	0.08708	-11.835	16/9/2003	0.18316	-14.931
6/6/2000	0.09667	-12.610	29/1/2002	0.07485	-13.056	23/9/2003	0.18385	-14.852
13/6/2000	0.09489	-11.471	5/2/2002	0.03176	-12.736	30/9/2003	0.18406	-20.601
20/6/2000	0.09299	-7.110	12/2/2002	0.03472	-12.596	7/10/2003	0.18472	-14.868
27/6/2000	0.09253	-11.496	19/2/2002	0.02755	-11.701	14/10/2003	0.18671	-14.885
4/7/2000	0.09243	-11.510	26/2/2002	0.01599	-11.802	21/10/2003	0.18840	-14.520
11/7/2000	0.09216	-11.507	5/3/2002	0.02051	-11.794	28/10/2003	0.18780	-14.851
18/7/2000	0.09205	-11.505	12/3/2002	0.02878	-11.921	4/11/2003	0.19995	-15.034
25/7/2000	0.09159	-11.516	19/3/2002	0.00794	-11.962	11/11/2003	0.18968	-15.300
1/8/2000	0.09153	-11.523	26/3/2002	0.00926	-11.952	18/11/2003	0.17294	-5.399
8/8/2000	0.09153	-11.523	2/4/2002	0.01111	-11.998	25/11/2003	0.15615	-16.152

2 Semanas de Antecedência. Modelo: $E(t) = a1.E(t-2) + b1.P_{ETA}(t) + \xi(t)$

Obs.: Para as datas anteriores a 22/12/1998, os parâmetros são iguais a essa data, ou seja, $a1 = -0.09710$ e $b1 = -17.739$

Data	a1	b1	Data	a1	b1	Data	a1	b1
22/12/1998	-0.09710	-17.739	15/8/2000	0.20750	-7.701	9/4/2002	0.14919	-6.888
29/12/1998	-0.09278	-17.020	22/8/2000	0.20641	-7.598	16/4/2002	0.14919	-6.888
5/1/1999	-0.11483	-18.107	29/8/2000	0.20401	-7.471	23/4/2002	0.14869	-6.886
12/1/1999	-0.09534	-16.264	5/9/2000	0.20380	-7.694	30/4/2002	0.14872	-6.882
19/1/1999	-0.09697	-16.447	12/9/2000	0.20404	-7.949	7/5/2002	0.14872	-6.882
26/1/1999	-0.10261	-16.301	19/9/2000	0.20230	-7.734	14/5/2002	0.14872	-6.882
2/2/1999	-0.09415	-16.494	26/9/2000	0.20322	-7.984	21/5/2002	0.14854	-6.138
9/2/1999	-0.09453	-15.251	3/10/2000	0.20145	-7.970	28/5/2002	0.14807	-6.038
16/2/1999	-0.09993	-20.176	10/10/2000	0.20507	-1.038	4/6/2002	0.14830	-6.855
23/2/1999	-0.09995	-14.996	17/10/2000	0.20280	-7.257	11/6/2002	0.14830	-6.855
2/3/1999	-0.10919	-13.465	24/10/2000	0.20334	-7.306	18/6/2002	0.14846	-8.285
9/3/1999	-0.10361	-12.226	31/10/2000	0.22113	-8.231	25/6/2002	0.14836	-6.808
16/3/1999	-0.10439	-11.995	7/11/2000	0.22166	-9.065	2/7/2002	0.14845	-6.596
23/3/1999	-0.10117	-12.536	14/11/2000	0.21217	-7.939	9/7/2002	0.14850	-6.867
30/3/1999	-0.07507	-8.299	21/11/2000	0.21219	-8.854	16/7/2002	0.14869	-5.747
6/4/1999	-0.03185	-9.173	28/11/2000	0.21649	-9.098	23/7/2002	0.14871	-6.887
13/4/1999	-0.13354	-19.947	5/12/2000	0.21049	-9.574	30/7/2002	0.14871	-6.887
20/4/1999	-0.10562	-12.536	12/12/2000	0.19907	-13.118	6/8/2002	0.14840	-7.472
27/4/1999	-0.10119	-12.578	19/12/2000	0.19480	-10.166	13/8/2002	0.14823	-6.785
4/5/1999	-0.10597	-12.469	26/12/2000	0.19525	-10.240	20/8/2002	0.14821	-6.876
11/5/1999	-0.10582	-12.505	2/1/2001	0.19983	-9.222	27/8/2002	0.14785	-6.843
18/5/1999	-0.11175	-12.970	9/1/2001	0.20300	-12.220	3/9/2002	0.14828	-6.868
25/5/1999	-0.10506	-12.354	16/1/2001	0.16311	-6.315	10/9/2002	0.14828	-6.868
1/6/1999	-0.10593	-12.461	23/1/2001	0.18880	-7.705	17/9/2002	0.14794	-6.845
8/6/1999	-0.10593	-12.461	30/1/2001	0.11937	-4.961	24/9/2002	0.14773	-6.813
15/6/1999	-0.08332	-2.174	6/2/2001	0.16887	-4.220	1/10/2002	0.14503	-6.355
22/6/1999	-0.10561	-12.500	13/2/2001	0.18547	-4.637	8/10/2002	0.14552	-6.320
29/6/1999	-0.10395	-12.337	20/2/2001	0.14228	-2.484	15/10/2002	0.15795	-6.828
6/7/1999	-0.10546	-12.456	27/2/2001	0.14411	-0.837	22/10/2002	0.15838	-7.323
13/7/1999	-0.10592	-12.559	6/3/2001	0.14147	-1.169	29/10/2002	0.14858	-7.825
20/7/1999	-0.10576	-12.410	13/3/2001	0.14306	-1.151	5/11/2002	0.15137	-7.330
27/7/1999	-0.10819	-12.518	20/3/2001	0.14582	-1.186	12/11/2002	0.14384	-8.117
3/8/1999	-0.10647	-12.399	27/3/2001	0.14566	-1.273	19/11/2002	0.14001	-8.419
10/8/1999	-0.10337	-12.021	3/4/2001	0.14915	-1.504	26/11/2002	0.14071	-8.183
17/8/1999	-0.10601	-12.112	10/4/2001	0.14929	-1.569	3/12/2002	0.14695	-8.313
24/8/1999	-0.10605	-12.335	17/4/2001	0.14847	-1.580	10/12/2002	0.14634	-10.403
31/8/1999	-0.10661	-12.243	24/4/2001	0.14823	-1.572	17/12/2002	0.14568	-8.384
7/9/1999	-0.10661	-12.209	1/5/2001	0.14748	-1.601	24/12/2002	0.13303	-9.389
14/9/1999	-0.17413	-17.628	8/5/2001	0.14748	-1.772	31/12/2002	0.12485	-10.717
21/9/1999	-0.10720	-12.068	15/5/2001	0.14771	-1.800	7/1/2003	0.14226	-6.259
28/9/1999	-0.10692	-12.079	22/5/2001	0.14775	-1.817	14/1/2003	0.03059	-13.558
5/10/1999	-0.10503	-12.578	29/5/2001	0.14858	-1.456	21/1/2003	-0.00443	-13.317
12/10/1999	-0.10592	-12.943	5/6/2001	0.14812	-1.860	28/1/2003	-0.02511	-11.361
19/10/1999	-0.10819	-12.904	12/6/2001	0.14812	-1.860	4/2/2003	-0.08291	-15.228
26/10/1999	-0.11835	-15.822	19/6/2001	0.14779	-1.864	11/2/2003	-0.09923	-15.665
2/11/1999	-0.11888	-16.601	26/6/2001	0.14781	-1.326	18/2/2003	-0.11329	-17.245
9/11/1999	-0.13475	-16.512	3/7/2001	0.14780	-1.854	25/2/2003	-0.13374	-18.218
16/11/1999	-0.13357	-15.843	10/7/2001	0.14780	-1.854	4/3/2003	-0.10670	-18.622
23/11/1999	-0.15137	-27.459	17/7/2001	0.14780	-1.854	11/3/2003	-0.06462	-19.595
30/11/1999	-0.13136	-16.191	24/7/2001	0.14780	-1.854	18/3/2003	-0.05467	-19.860
7/12/1999	-0.13595	-18.935	31/7/2001	0.14781	-2.029	25/3/2003	-0.02974	-20.038

14/12/1999	-0.13052	-27.713	7/8/2001	0.14776	-1.864	1/4/2003	-0.02942	-39.531
21/12/1999	-0.14094	-28.002	14/8/2001	0.14794	-1.785	8/4/2003	-0.01255	-20.272
28/12/1999	0.08247	-20.035	21/8/2001	0.14777	-1.818	15/4/2003	-0.01201	-20.306
4/1/2000	0.07491	-16.965	28/8/2001	0.14858	-1.865	22/4/2003	-0.00676	-18.793
11/1/2000	0.05907	-17.063	4/9/2001	0.14858	-1.865	29/4/2003	-0.00871	-20.257
18/1/2000	0.02991	-17.236	11/9/2001	0.14918	-1.814	6/5/2003	-0.00844	-20.281
25/1/2000	0.03439	-11.959	18/9/2001	0.15007	-1.760	13/5/2003	-0.00701	-20.025
1/2/2000	0.04949	-14.242	25/9/2001	0.15047	-1.818	20/5/2003	-0.00442	-21.536
8/2/2000	0.12834	-12.830	2/10/2001	0.14840	-1.633	27/5/2003	-0.00721	-20.338
15/2/2000	0.15728	-11.426	9/10/2001	0.14790	-2.146	3/6/2003	-0.00721	-20.338
22/2/2000	0.18884	-9.684	16/10/2001	0.15636	-2.537	10/6/2003	-0.00721	-20.338
29/2/2000	0.17721	-11.563	23/10/2001	0.15366	-2.832	17/6/2003	-0.00721	-20.338
7/3/2000	0.19646	-8.923	30/10/2001	0.15399	-2.804	24/6/2003	-0.00721	-20.338
14/3/2000	0.20651	-8.235	6/11/2001	0.15694	-2.132	1/7/2003	-0.00719	-20.529
21/3/2000	0.21253	-8.015	13/11/2001	0.15736	-0.095	8/7/2003	-0.00883	-20.135
28/3/2000	0.21104	-7.926	20/11/2001	0.16916	-2.483	15/7/2003	-0.00957	-26.140
4/4/2000	0.20661	-9.548	27/11/2001	0.17623	-1.598	22/7/2003	-0.00734	-20.322
11/4/2000	0.20803	-3.296	4/12/2001	0.17234	-1.554	29/7/2003	-0.00733	-20.320
18/4/2000	0.20703	-8.091	11/12/2001	0.17179	-0.771	5/8/2003	-0.00741	-20.303
25/4/2000	0.20862	-0.060	18/12/2001	0.17034	-0.922	12/8/2003	-0.00702	-20.234
2/5/2000	0.20778	-8.017	25/12/2001	0.17168	-1.219	19/8/2003	-0.00596	-11.086
9/5/2000	0.21094	-8.017	1/1/2002	0.15300	-1.881	26/8/2003	-0.00551	-20.054
16/5/2000	0.21055	-8.070	8/1/2002	0.13856	-1.463	2/9/2003	-0.00562	-20.033
23/5/2000	0.21099	-8.086	15/1/2002	0.13565	-1.124	9/9/2003	-0.00501	-20.016
30/5/2000	0.21012	-9.786	22/1/2002	0.11530	0.224	16/9/2003	-0.00506	-20.040
6/6/2000	0.21018	-8.071	29/1/2002	0.12177	0.201	23/9/2003	-0.00689	-22.460
13/6/2000	0.21012	-8.073	5/2/2002	0.14637	-7.670	30/9/2003	-0.00487	-19.592
20/6/2000	0.21012	-8.073	12/2/2002	0.14466	-8.838	7/10/2003	-0.00467	-19.758
27/6/2000	0.21012	-8.073	19/2/2002	0.14081	-6.074	14/10/2003	-0.00396	-19.938
4/7/2000	0.21012	-8.073	26/2/2002	0.11440	-7.880	21/10/2003	-0.00708	-21.028
11/7/2000	0.21012	-8.073	5/3/2002	0.13922	-6.959	28/10/2003	0.00964	-21.073
18/7/2000	0.21012	-8.073	12/3/2002	0.14412	-7.001	4/11/2003	-0.01039	-30.895
25/7/2000	0.21012	-8.073	19/3/2002	0.14871	-6.934	11/11/2003	-0.01447	-21.606
1/8/2000	0.20953	-8.054	26/3/2002	0.14720	-6.803	18/11/2003	0.00015	-20.974
8/8/2000	0.20991	-8.014	2/4/2002	0.14843	-6.797	25/11/2003	0.00432	-19.424

ANEXO D

PARÂMETROS DO MODELO DE RESÍDUOS EM SOBRADINHO

1 Semana de Antecedência. Período de 1996 a 2000

Modelo: $E(t) = a1.E(t-1) + a2.E(t-2) + \xi(t)$

Obs.: i) os valores dos resíduos (E) são subtraídos da média de 3 anos da semana correspondente; ii) Para as datas anteriores a 22/12/1998, os parâmetros são iguais a essa data, ou seja, $a1=0.27246$ e $a2=0.42675$

Data	a1	a2	Data	a1	a2
22/12/1998	0.27246	0.42675	28/12/1999	0.45123	0.26031
29/12/1998	0.28891	0.42902	4/1/2000	0.43272	0.29847
5/1/1999	0.29346	0.43992	11/1/2000	0.45913	0.24228
12/1/1999	0.31092	0.45035	18/1/2000	0.42543	0.25042
19/1/1999	0.30371	0.45069	25/1/2000	0.40344	0.23576
26/1/1999	0.29628	0.46108	1/2/2000	0.40597	0.28066
2/2/1999	0.30022	0.46092	8/2/2000	0.43700	0.23923
9/2/1999	0.30451	0.47290	15/2/2000	0.46182	0.22985
16/2/1999	0.30195	0.46591	22/2/2000	0.49992	0.22118
23/2/1999	0.30197	0.46317	29/2/2000	0.48126	0.21803
2/3/1999	0.30337	0.46281	7/3/2000	0.50217	0.21171
9/3/1999	0.31743	0.45730	14/3/2000	0.54653	0.15369
16/3/1999	0.33246	0.42186	21/3/2000	0.57818	0.11627
23/3/1999	0.38055	0.37637	28/3/2000	0.53211	0.15367
30/3/1999	0.39569	0.36202	4/4/2000	0.64375	0.04928
6/4/1999	0.38829	0.37119	11/4/2000	0.63922	0.04730
13/4/1999	0.38324	0.36943	18/4/2000	0.63825	0.05103
20/4/1999	0.38001	0.37470	25/4/2000	0.63679	0.05494
27/4/1999	0.38102	0.37455	2/5/2000	0.63935	0.05527
4/5/1999	0.38213	0.37516	9/5/2000	0.64057	0.06024
11/5/1999	0.38094	0.37618	16/5/2000	0.64009	0.05823
18/5/1999	0.38139	0.37444	23/5/2000	0.63737	0.05969
25/5/1999	0.38000	0.37649	30/5/2000	0.63800	0.05906
1/6/1999	0.38062	0.37540	6/6/2000	0.64045	0.05556
8/6/1999	0.38062	0.37540	13/6/2000	0.63589	0.05736
15/6/1999	0.38062	0.37540	20/6/2000	0.63638	0.05712
22/6/1999	0.38029	0.37495	27/6/2000	0.63469	0.05976
29/6/1999	0.38125	0.37645	4/7/2000	0.63534	0.05955
6/7/1999	0.38075	0.37611	11/7/2000	0.63624	0.05859
13/7/1999	0.38052	0.37650	18/7/2000	0.63528	0.05945
20/7/1999	0.37968	0.37668	25/7/2000	0.63510	0.05872
27/7/1999	0.37968	0.37708	1/8/2000	0.63501	0.05850
3/8/1999	0.37968	0.37679	8/8/2000	0.63367	0.06047
10/8/1999	0.37968	0.37679	15/8/2000	0.63392	0.06156
17/8/1999	0.37936	0.37792	22/8/2000	0.63348	0.06055
24/8/1999	0.37914	0.37915	29/8/2000	0.63414	0.06025
31/8/1999	0.37786	0.37949	5/9/2000	0.63435	0.05952
7/9/1999	0.37851	0.37890	12/9/2000	0.63357	0.06128
14/9/1999	0.37890	0.37795	19/9/2000	0.63354	0.06112
21/9/1999	0.37936	0.37803	26/9/2000	0.63424	0.05941
28/9/1999	0.37850	0.37886	3/10/2000	0.63307	0.06136

5/10/1999	0.37868	0.37869	10/10/2000	0.63428	0.05771
12/10/1999	0.37866	0.37952	17/10/2000	0.63363	0.05889
19/10/1999	0.37866	0.37952	24/10/2000	0.63412	0.05927
26/10/1999	0.37941	0.37803	31/10/2000	0.63430	0.05845
2/11/1999	0.38751	0.36761	7/11/2000	0.63182	0.06171
9/11/1999	0.39212	0.36487	14/11/2000	0.65396	0.05091
16/11/1999	0.38839	0.37267	21/11/2000	0.63627	0.06897
23/11/1999	0.38367	0.37824	28/11/2000	0.61988	0.06399
30/11/1999	0.36194	0.39756	5/12/2000	0.61517	0.05980
7/12/1999	0.40528	0.34938	12/12/2000	0.57292	0.03789
14/12/1999	0.42045	0.34074	19/12/2000	0.57859	0.05488
21/12/1999	0.53929	0.19917	26/12/2000	0.58676	0.05984

1 Semana de Antecedência. Período de 2000 a 2003

Modelo: $E(t) = a1.E(t-1) + a2.E(t-2) + \xi(t)$

Obs.: Para as datas entre 28/12/1999 a 19/12/2001, os parâmetros são iguais a: $a1=0.03177$ e $a2=0.52597$

Data	a1	a2	Data	a1	a2
19/12/2001	0.03177	0.52597	11/12/2002	-0.08689	0.35719
26/12/2001	0.32166	0.38133	18/12/2002	-0.08823	0.36606
2/1/2002	0.44244	0.47126	25/12/2002	-0.07289	0.36609
9/1/2002	0.20815	0.24038	1/1/2003	-0.08124	0.37139
16/1/2002	-0.24652	0.91678	8/1/2003	-0.05624	0.38540
23/1/2002	-0.43098	0.99999	15/1/2003	-0.04003	0.39385
30/1/2002	-0.32237	0.75346	22/1/2003	-0.07196	0.39088
6/2/2002	-0.20601	0.57056	29/1/2003	-0.05124	0.37152
13/2/2002	-0.31079	0.28171	5/2/2003	-0.04963	0.37090
20/2/2002	-0.32077	0.27648	12/2/2003	-0.05001	0.39476
27/2/2002	-0.32033	0.28290	19/2/2003	-0.02693	0.39530
6/3/2002	-0.35813	0.30377	26/2/2003	-0.06027	0.31975
13/3/2002	-0.18787	0.32424	5/3/2003	-0.07284	0.32420
20/3/2002	-0.19244	0.31837	12/3/2003	-0.06939	0.31001
27/3/2002	-0.21394	0.27638	19/3/2003	-0.06717	0.28933
3/4/2002	-0.21832	0.27851	26/3/2003	-0.02744	0.29863
10/4/2002	-0.21377	0.27348	2/4/2003	-0.04050	0.28783
17/4/2002	-0.21009	0.27968	9/4/2003	-0.03963	0.24115
24/4/2002	-0.20486	0.28271	16/4/2003	-0.04331	0.24017
1/5/2002	-0.20045	0.28894	23/4/2003	-0.04392	0.23081
8/5/2002	-0.19198	0.29506	30/4/2003	-0.04329	0.22913
15/5/2002	-0.18274	0.30381	7/5/2003	-0.04361	0.22824
22/5/2002	-0.18055	0.30605	14/5/2003	-0.03083	0.22796
29/5/2002	-0.17801	0.31102	21/5/2003	-0.04389	0.22715
5/6/2002	-0.17376	0.31329	28/5/2003	-0.01037	0.22728
12/6/2002	-0.17063	0.31734	4/6/2003	-0.04281	0.22641
19/6/2002	-0.16652	0.32105	11/6/2003	-0.04281	0.22641
26/6/2002	-0.16255	0.32481	18/6/2003	-0.04049	0.22828
3/7/2002	-0.16105	0.32623	25/6/2003	-0.04034	0.22886
10/7/2002	-0.16098	0.32648	2/7/2003	-0.04346	0.23001
17/7/2002	-0.16108	0.32642	9/7/2003	-0.03851	0.23126
24/7/2002	-0.16139	0.32548	16/7/2003	-0.02931	0.23209
31/7/2002	-0.16055	0.32574	23/7/2003	-0.03545	0.23328
7/8/2002	-0.16055	0.32574	30/7/2003	-0.03310	0.23384

14/8/2002	-0.10639	0.32560	6/8/2003	-0.03478	0.23507
21/8/2002	-0.16049	0.32551	13/8/2003	-0.03405	0.23594
28/8/2002	-0.16143	0.32567	20/8/2003	-0.03213	0.23715
4/9/2002	-0.17776	0.32614	27/8/2003	-0.03289	0.23807
11/9/2002	-0.16187	0.32693	3/9/2003	-0.03045	0.23891
18/9/2002	-0.15427	0.33009	10/9/2003	-0.02976	0.23938
25/9/2002	-0.15060	0.33212	17/9/2003	-0.02965	0.24020
2/10/2002	-0.14564	0.34239	24/9/2003	-0.02807	0.24106
9/10/2002	-0.13365	0.34774	1/10/2003	-0.02690	0.24178
16/10/2002	-0.13593	0.34497	8/10/2003	-0.02619	0.24301
23/10/2002	-0.23182	0.34366	15/10/2003	-0.02459	0.24300
30/10/2002	-0.13523	0.34467	22/10/2003	-0.02544	0.24458
6/11/2002	-0.11959	0.34974	29/10/2003	-0.02464	0.24487
13/11/2002	-0.07950	0.37740	5/11/2003	-0.02573	0.24250
20/11/2002	-0.07880	0.37821	12/11/2003	-0.02573	0.24250
27/11/2002	-0.08532	0.35458	19/11/2003	-0.02616	0.24466
4/12/2002	-0.08592	0.35716	26/11/2003	-0.02429	0.24443

2 Semanas de Antecedência. Período 1996 a 2000

Modelo: $E(t) = a1.E(t-2) + \xi(t)$

Obs.: i) os valores dos resíduos (E) são subtraídos da média de 3 anos da semana correspondente; ii) Para as datas anteriores a 22/12/1998, o parâmetro é igual a essa data, ou seja, $a1=0.05850$

Data	a1	Data	a1
22/12/1998	0.05850	28/12/1999	0.13553
29/12/1998	0.05344	4/1/2000	0.08603
5/1/1999	0.06839	11/1/2000	0.09101
12/1/1999	0.08024	18/1/2000	0.04038
19/1/1999	0.10305	25/1/2000	0.04342
26/1/1999	0.10503	1/2/2000	-0.01622
2/2/1999	0.10873	8/2/2000	-0.00794
9/2/1999	0.11019	15/2/2000	0.00374
16/2/1999	0.10624	22/2/2000	-0.06446
23/2/1999	0.09686	29/2/2000	-0.02020
2/3/1999	0.08745	7/3/2000	0.05986
9/3/1999	0.08458	14/3/2000	0.03701
16/3/1999	0.07506	21/3/2000	0.03493
23/3/1999	0.07089	28/3/2000	0.03139
30/3/1999	0.03206	4/4/2000	0.01793
6/4/1999	0.05382	11/4/2000	0.02366
13/4/1999	0.07396	18/4/2000	0.05343
20/4/1999	0.07823	25/4/2000	0.06889
27/4/1999	0.08090	2/5/2000	0.07331
4/5/1999	0.08522	9/5/2000	0.08935
11/5/1999	0.09218	16/5/2000	0.09652
18/5/1999	0.09712	23/5/2000	0.10531
25/5/1999	0.09656	30/5/2000	0.10878
1/6/1999	0.09820	6/6/2000	0.10932
8/6/1999	0.09639	13/6/2000	0.10693
15/6/1999	0.09674	20/6/2000	0.10627
22/6/1999	0.09548	27/6/2000	0.10694

29/6/1999	0.09602	4/7/2000	0.10697
6/7/1999	0.09615	11/7/2000	0.10697
13/7/1999	0.09587	18/7/2000	0.10764
20/7/1999	0.09595	25/7/2000	0.10741
27/7/1999	0.09571	1/8/2000	0.10694
3/8/1999	0.09352	8/8/2000	0.10682
10/8/1999	0.09436	15/8/2000	0.10697
17/8/1999	0.09412	22/8/2000	0.10700
24/8/1999	0.09443	29/8/2000	0.10651
31/8/1999	0.09451	5/9/2000	0.10666
7/9/1999	0.09376	12/9/2000	0.10803
14/9/1999	0.09446	19/9/2000	0.10962
21/9/1999	0.09512	26/9/2000	0.10161
28/9/1999	0.09451	3/10/2000	0.10217
5/10/1999	0.09652	10/10/2000	0.09702
12/10/1999	0.09652	17/10/2000	0.09291
19/10/1999	0.09911	24/10/2000	0.08934
26/10/1999	0.10160	31/10/2000	0.08362
2/11/1999	0.09865	7/11/2000	0.08451
9/11/1999	0.12334	14/11/2000	0.08362
16/11/1999	0.13236	21/11/2000	0.09489
23/11/1999	0.13779	28/11/2000	0.10654
30/11/1999	0.11357	5/12/2000	0.08300
7/12/1999	0.11161	12/12/2000	0.07276
14/12/1999	0.08064	19/12/2000	0.03375
21/12/1999	0.16017	26/12/2000	0.03923

2 Semanas de Antecedência. Período 2000 a 2003

Modelo: $E(t) = a1.E(t-2) + \xi(t)$

Obs.: Para as datas entre 28/12/1999 a 19/12/2001, o parâmetro é igual a: $a1=0.106343$

Data	a1	Data	a1
19/12/2001	0.106343	11/12/2002	0.397208
26/12/2001	0.061576	18/12/2002	0.399771
2/1/2002	0.222405	25/12/2002	0.403152
9/1/2002	0.159358	1/1/2003	0.408243
16/1/2002	0.605871	8/1/2003	0.446235
23/1/2002	0.660693	15/1/2003	0.459004
30/1/2002	0.507028	22/1/2003	0.446115
6/2/2002	0.393705	29/1/2003	0.423581
13/2/2002	0.325727	5/2/2003	0.407527
20/2/2002	0.327479	12/2/2003	0.418744
27/2/2002	0.315282	19/2/2003	0.437065
6/3/2002	0.33473	26/2/2003	0.382344
13/3/2002	0.339458	5/3/2003	0.375749
20/3/2002	0.349397	12/3/2003	0.366016
27/3/2002	0.305178	19/3/2003	0.358672
3/4/2002	0.319115	26/3/2003	0.360391
10/4/2002	0.313305	2/4/2003	0.354152
17/4/2002	0.327688	9/4/2003	0.313846
24/4/2002	0.332372	16/4/2003	0.316221
1/5/2002	0.339286	23/4/2003	0.304754

8/5/2002	0.345211	30/4/2003	0.302432
15/5/2002	0.352086	7/5/2003	0.301794
22/5/2002	0.355058	14/5/2003	0.302365
29/5/2002	0.36048	21/5/2003	0.301287
5/6/2002	0.362778	28/5/2003	0.302053
12/6/2002	0.366129	4/6/2003	0.3003
19/6/2002	0.369423	11/6/2003	0.30061
26/6/2002	0.372796	18/6/2003	0.302494
3/7/2002	0.374508	25/6/2003	0.303182
10/7/2002	0.37395	2/7/2003	0.304476
17/7/2002	0.373515	9/7/2003	0.306212
24/7/2002	0.372384	16/7/2003	0.307297
31/7/2002	0.372384	23/7/2003	0.308684
7/8/2002	0.372231	30/7/2003	0.309345
14/8/2002	0.372352	6/8/2003	0.310865
21/8/2002	0.37235	13/8/2003	0.312189
28/8/2002	0.373047	20/8/2003	0.313743
4/9/2002	0.372956	27/8/2003	0.314942
11/9/2002	0.37395	3/9/2003	0.316301
18/9/2002	0.376339	10/9/2003	0.316583
25/9/2002	0.378612	17/9/2003	0.317601
2/10/2002	0.381291	24/9/2003	0.318743
9/10/2002	0.388133	1/10/2003	0.319625
16/10/2002	0.389416	8/10/2003	0.320903
23/10/2002	0.386586	15/10/2003	0.321297
30/10/2002	0.389884	22/10/2003	0.323017
6/11/2002	0.395057	29/10/2003	0.323489
13/11/2002	0.415252	5/11/2003	0.321164
20/11/2002	0.419753	12/11/2003	0.321164
27/11/2002	0.397659	19/11/2003	0.32255
4/12/2002	0.397072	26/11/2003	0.322165

ANEXO E

SÉRIE OBSERVADA DE SOI

Obs.: i) Valores correspondentes a média móvel de 3 meses; ii) números em azul referem-se a SOI abaixo do normal, em preto são valores abaixo do normal e vermelho são acima do normal

ANO	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	DJF
1950	-1.5	-1.4	-1.4	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1	-1
1951	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.3
1952	0.1	0.1	0.1	0	-0.2	-0.3	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	0.1
1953	0.3	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
1954	0.2	-0.1	-0.5	-0.7	-0.7	-0.8	-1	-1.1	-1.1	-1	-1	-1
1955	-0.9	-0.9	-1	-1.1	-1	-1	-1	-1.5	-1.8	-2.1	-1.7	-1.2
1956	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9	-0.9	-0.8	-0.5
1957	-0.1	0.2	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	1.2	1.5	1.6
1958	1.5	1.1	0.7	0.5	0.5	0.4	0.1	0	0	0.1	0.3	0.4
1959	0.4	0.3	0.2	0	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3
1960	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	0	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2
1961	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	0.1	0	-0.3	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5
1962	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
1963	-0.3	0	0.1	0.1	0.3	0.6	0.8	0.8	0.9	1	1	0.8
1964	0.4	-0.1	-0.5	-0.7	-0.7	-0.8	-0.9	-1	-1.1	-1.1	-1	-0.8
1965	-0.5	-0.3	0	0.2	0.6	1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.5	1.2
1966	1.1	0.8	0.5	0.2	0.1	0.1	0	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4
1967	-0.5	-0.6	-0.5	-0.3	0	0	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7
1968	-0.9	-0.8	-0.8	-0.4	0	0.3	0.3	0.2	0.4	0.6	0.9	1
1969	1	0.9	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5
1970	0.3	0.2	0.1	-0.1	-0.4	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1.2	-1.4
1971	-1.4	-1.2	-1	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9	-1	-0.9	-0.7
1972	-0.3	0	0.3	0.5	0.8	1.1	1.3	1.5	1.8	2	2.1	1.8
1973	1.2	0.5	-0.1	-0.5	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.7	-1.9	-2	-1.8
1974	-1.6	-1.2	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-0.7	-0.6
1975	-0.6	-0.7	-0.8	-1	-1.1	-1.3	-1.4	-1.6	-1.6	-1.7	-1.8	-1.6
1976	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.7
1977	0.4	0	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.7
1978	0.4	0	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1
1979	0	0.1	0.2	0.1	0	0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5
1980	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0	-0.1	0	0	-0.1	-0.3
1981	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0
1982	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	1	1.5	1.9	2.2	2.3	2.3
1983	2	1.6	1.2	1	0.6	0.2	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.8	-0.5
1984	-0.3	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-1	-1.1	-1
1985	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.4
1986	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2	1.3
1987	1.2	1.1	1	1	1.2	1.5	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1	0.8
1988	0.5	0.1	-0.3	-0.8	-1.2	-1.2	-1.1	-1.3	-1.6	-1.9	-1.9	-1.7
1989	-1.5	-1.1	-0.9	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	0.1
1990	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5
1991	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.8	1	1.4	1.7	1.8
1992	1.7	1.6	1.4	1.1	0.8	0.4	0.2	-0.1	-0.1	0	0.1	0.3
1993	0.4	0.6	0.8	0.8	0.7	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2

1994	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.9	1.2	1.3	1.2
1995	0.9	0.7	0.4	0.2	0.1	0	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8
1996	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4
1997	-0.3	0	0.4	0.9	1.4	1.7	2	2.3	2.4	2.5	2.5	2.4
1998	2	1.4	1.1	0.4	-0.1	-0.8	-1	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
1999	-1.2	-0.9	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9	-1	-1.2	-1.4	-1.6	-1.6
2000	-1.5	-1.1	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7
2001	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1
2002	0.1	0.3	0.4	0.7	0.8	0.9	0.9	1.1	1.3	1.5	1.3	1.1
2003	0.8	0.6	0.1	-0.1	0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.5	0.4
2004	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6
