

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**PREVISÃO DE CHEIAS POR CONJUNTO EM
CURTO PRAZO**

Adalberto Meller

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 obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador

Prof. Dr. Walter Collischonn

Banca Examinadora

Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira

IPH-UFRGS

Prof. Dr. Eber José de Andrade Pinto

CPRM/UFMG

Prof. Dr. Pedro Leite da Silva Dias

LNCC/IAG-USP

Porto Alegre-RS, 18 de dezembro de 2012

O presente 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. Walter Collischonn.

Life is uncertain. Eat dessert first.

(Ernestine Ulmer)

Resumo

A previsão e emissão de alertas antecipados constituem um dos principais elementos na prevenção dos impactos ocasionados por eventos de cheias. Uma das formas utilizadas para se obter uma ampliação do horizonte de previsão é através do uso da modelagem chuva-vazão associada à previsão de precipitação, tipicamente derivada de modelos meteorológicos. A precipitação, no entanto, é uma das variáveis que impõe maior dificuldade na previsão meteorológica, sendo considerada uma das principais fontes de incerteza nos resultados da previsão de cheias. A previsão por conjunto é uma técnica originalmente desenvolvida nas ciências atmosféricas e procura explorar as incertezas associadas às condições iniciais e/ou deficiências na estrutura dos modelos meteorológicos com intuito de melhorar sua previsibilidade. A partir de diferentes modelos meteorológicos ou de diferentes condições iniciais de um único modelo, são gerados um conjunto de previsões que representam possíveis trajetórias dos processos atmosféricos ao longo do horizonte de previsão. Pesquisas recentes, principalmente na Europa e Estados Unidos, têm mostrado resultados promissores do acoplamento de previsões meteorológicas por conjunto à modelos hidrológicos para realizar previsões de cheia. Essa pesquisa trata da avaliação do benefício da previsão de cheias por conjunto em curto prazo, em uma bacia de médio porte, utilizando dados e de ferramentas para previsão de vazões disponíveis em modo operacional no Brasil. Como estudo de caso foi utilizada a bacia do Rio Paraopeba (12.150km²), de clima tipicamente tropical, localizada na região sudeste do Brasil. A metodologia proposta para geração das previsões hidrológicas utilizou o modelo hidrológico MGB-IPH alimentado por um conjunto previsões de precipitação de diferentes modelos, com diferentes condições iniciais e parametrizações, dando origem a distintos cenários de previsão de vazões. Como parâmetro de referência na avaliação do desempenho das previsões por conjunto foi utilizada uma previsão hidrológica determinística única, baseada em uma previsão de precipitação obtida da combinação ótima de saídas de diversos modelos meteorológicos. As previsões foram realizadas retrospectivamente no período entre ago/2008 e mai/2011, sendo analisadas durante o período chuvoso dos anos hidrológicos (out-abr). Os resultados das previsões de cheia por conjunto foram avaliados através de uma representação determinística, considerando a média dos membros do conjunto, assim como através de uma representação probabilística, considerando todos os membros, através de medidas de desempenho específicas para esse fim. Na avaliação determinística, a média do conjunto hidrológico apresentou resultados similares aos obtido com a previsão determinística de referência, embora tenha apresentado benefício significativo em relação à maior parte dos membros do conjunto. A avaliação das previsões de cheia por conjunto, por sua vez, mostrou a existência de uma superestimativa e de um subespalhamento dos membros em relação às observações, sobretudo nos primeiros intervalos de tempo da previsão. Na comparação dos resultados das previsões de eventos

do tipo dicótomos, que consideram a superação ou não de vazões limites de alerta, o 9º decil das previsões por conjunto mostrou superioridade em relação à previsão determinística de referência e mesmo a média do conjunto, sendo possível obter, na maior parte dos casos analisados, um aumento significativo na proporção de eventos corretamente previstos mantendo as taxas de alarmes falsos em níveis reduzidos. Esse benefício foi, de modo geral, maior para maiores antecedências e vazões limites, situações mais importantes num contexto de prevenção de cheias. Os resultados mostraram ainda que, em média, uma diminuição do número de membros do conjunto diminui seu desempenho nas previsões.

Palavras-chave: previsão de cheias por conjunto, previsão de vazões, previsão de precipitação.

Abstract

The forecasting and issuing of early warnings represent a key element to prevent the impacts of flood events. An alternative to extend forecasting horizon is the use of rainfall-runoff modeling coupled with precipitation forecasts derived from numerical weather prediction (NWP) models. However, NWP models have difficulty to accurately predict precipitation due to the extremely sensitivity of the initial conditions. Therefore, this variable represents one of the major sources of uncertainties in flood forecasting. A probabilistic or ensemble forecasting approach was originally developed in the atmospheric sciences and then applied to other research areas. This procedure explores the uncertainties related to initial conditions and deficiencies in the structure of NWP models intending to improve its predictability. Using different NWP models or different initial conditions of a single model, an ensemble forecast showing possible trajectories of atmospheric processes over the forecast horizon are produced. Recent studies developed in Europe and the United States have shown promising results in flood forecasting using hydrological models fed by NWP ensemble outputs. The present research assess the performance of short term ensemble flood forecasting in a medium size tropical basin, based on data and streamflow forecasting tools available in operational mode in Brazil. The Paraopeba River basin (12,150 km²), located in the upper portion of the São Francisco River basin, in Southeastern Brazil, was selected as a case study. The proposed methodology used the MGB-IPH hydrological coupled to an ensemble of precipitation forecasts generated by several models with different initial conditions and parameterizations. The results are several scenarios of streamflow forecasts. A single deterministic streamflow forecast, based on a quantitative precipitation forecast derived from the optimal combination of several outputs of NWP models, was used as a reference to assess the performance of the streamflow ensemble forecasts. The streamflow forecasts were performed between aug/2008 and may/2011 and were analyzed during the rainy seasons (austral summer). The results from the ensemble flood forecasting were assessed by deterministic and probabilistic performance measures, with the ensemble mean being used by the former, and specific assessment measure by the later. Based on the deterministic assessment, the ensemble mean showed similar results to those obtained by the deterministic reference forecast, although showing better performance over most of the ensemble members. Based on the probabilistic performance measures, however, results showed the existence of an ensemble overforecasting and underspread of the members in regard to observed values, especially during the first lead times. The results for predictions of dichotomous events, which mean exceeding or not flood warning thresholds, showed that the 9th decile of the ensemble over performed the deterministic forecast and even the ensemble mean. In most cases, it was observed an increase in the proportion of correctly forecasted events while keeping false alarm rates at low levels. This benefit was generally higher for higher flow thresholds and for longer lead

times, which are the most important situations for flood mitigation. The results show, also, that, in average, a reduction in the number of ensemble members decreases the performance of ensemble flood forecasts.

Keywords: ensemble flood forecasting, streamflow forecasting, quantitative precipitation forecasting.

Agradecimentos

A Deus, a minha família e a minha namorada Daniela;

A Agência Nacional de Águas, pela concessão de licença para conclusão do curso de doutorado;

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, por me oportunizar um ambiente de aprendizado de alto nível;

Meu profundo agradecimento ao Prof. Walter Collischonn, pelas lições de hidrologia, pela disponibilidade de tempo, pelo entusiasmo contagiante e pela maneira tranquila e sábia com que conduziu a orientação desse trabalho;

Aos amigos Juan Martin Bravo e Adriano Rolim da Paz, pelo incentivo contínuo e pelas inúmeras revisões do texto que contribuíram para o aperfeiçoamento das análises e do manuscrito final;

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudo durante o período de realização das disciplinas;

A Cemig, pela disponibilização dos dados telemétricos de vazão e precipitação utilizados;

A Amauri Silva, Demerval Moreira e ao Prof. Pedro Dias por cederem os dados de previsão de precipitação utilizados e por dirimir dúvidas a respeito destes;

Aos amigos Adrien Paris, Diogo Buarque, Fernando Fan, Mino Sorribas, Márcio Giacomoni, Paulo Pontes e Rodrigo Paiva pelo auxílio em solucionar dúvidas e na realização de algumas atividades importantes na etapa inicial do trabalho;

Ao amigo Fernando Dornelles "Bike", pelos questionamentos envolvendo assuntos da tese e, em especial, por ter me hospedado no período final da estadia em Porto Alegre;

Ao Prof. Tucci, pela orientação e pelos ensinamentos transmitidos durante a etapa inicial do curso de doutorado;

A Prof. Edith Beatriz Schettini, pelas palavras de motivação e pela orientação em questões relacionados ao Programa de Pós-Graduação do IPH;

As colegas de trabalho Neuza de Oliveira e a Roxane Pinheiro, pelo auxílio e orientação em assuntos referentes ao Programa de Capacitação da Agência;

Por fim, agradeço aos amigos Katiúcia, Karena, Margarita, Guto, Harrisson, Leirson, Tourinho, Vinícius, Paulo, Mariana, Rosane, Anelise, Rafael, Carlos, Angélica, ao trio Rutinéia-Daniel-Gabriel, Ana Cecília, Paula, Diana, Shirlei, Gilson Tadeu, Márcio, Leonardo, Gabriela, Vado, Alemão, Alice, Mano, Ferdnando, Ênio, Bruno, Lidi, Ruberto, Christopher, Othon e ao pessoal do futebol do IPH, pela convivência saudável e pelos momentos de descontração que muito contribuíram para meu bem-estar e produtividade durante o período de curso.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e justificativa	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura do texto	4
2	Previsão de Vazões	5
2.1	Aspectos gerais	5
2.2	Definições e conceitos na previsão de vazões	5
2.3	Modelos para previsão de vazões	6
2.3.1	Procedimentos para previsão de vazões em tempo real	7
2.4	Assimilação de dados	10
2.4.1	Atualização das variáveis de entrada	11
2.4.2	Atualização das variáveis de estado	12
2.4.3	Atualização dos parâmetros	13
2.4.4	Atualização da saída	13
2.4.5	Considerações finais	14
2.5	Verificação das previsões	14
2.5.1	Previsões determinísticas	15
2.5.2	Previsões probabilísticas ou por conjunto	19
3	Fontes de Dados de Precipitação na Previsão de Cheias	28
3.1	Previsão quantitativa de precipitação (QPF)	29
3.1.1	Métodos para obtenção da QPF	30
3.1.2	Previsão numérica do tempo (PNT)	30
3.1.3	Previsão por conjunto	32
4	Previsão de Cheias por Conjunto	36
4.1	Contextualização e conceitos	36
4.2	Aplicações	39
4.3	Comunicação dos resultados das previsões probabilísticas	46
4.4	Considerações finais	49
5	Metodologia	51
5.1	Modelagem hidrológica	52
5.1.1	O modelo MGB-IPH	52
5.1.2	Aspectos gerais da aplicação do modelo MGB-IPH	54
5.1.3	Dados hidrológicos e climatológicos	56
5.1.4	Validação dos dados hidrológicos	57
5.1.5	Calibração e validação do modelo hidrológico	58
5.2	Previsão de cheias	60
5.2.1	Previsão de vazões com o modelo MGB-IPH	60
5.2.2	Análise do método de assimilação de dados	64
5.2.3	Previsão de precipitação	65

5.2.4	Previsão de cheias por conjunto	67
5.2.5	Análise do impacto da redução do número de membros	70
6	Estudo de Caso	72
6.1	Características gerais	72
6.2	Dados utilizados.....	77
6.2.1	Hidrografia	77
6.2.2	Modelo digital de elevação	77
6.2.3	Tipos de solo	78
6.2.4	Usos do solo	81
6.2.5	Dados hidrológicos	82
6.2.6	Dados climatológicos	86
6.2.7	Dados de previsão de precipitação	86
7	Aplicação da Metodologia e Resultados.....	92
7.1	Modelagem hidrológica	92
7.1.1	Discretização da bacia.....	92
7.1.2	Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica	94
7.1.3	Validação dos dados hidrológicos.....	96
7.1.4	Calibração e verificação do modelo hidrológico	100
7.2	Previsão de cheias.....	104
7.2.1	Assimilação de dados.....	104
7.2.2	Previsão de precipitação.....	109
7.2.3	Previsão de cheias por conjunto.....	122
7.2.4	Análise do impacto da redução do número de membros	159
8	Conclusões e Recomendações	161
8.1	Modelagem hidrológica	161
8.2	Previsão de cheias.....	161
8.2.1	Previsão de precipitação.....	162
8.2.2	Assimilação de dados de vazão.....	162
8.2.3	Previsão de cheias por conjunto.....	163
8.2.4	Análise do impacto da redução do número de membros	164
8.3	Recomendações	164
	Referências Bibliográficas.....	166
	Anexos.....	176
Anexo 1	.....	176
Anexo 2	.....	185
Anexo 3	.....	194
Anexo 4	.....	196
Anexo 5	.....	199
Anexo 6	.....	204

Lista de Figuras

Figura 1. Tipos de procedimentos, dados e modelos que podem ser utilizados na previsão de vazões em tempo real. Adaptado de Tucci (2005).	9
Figura 2. Ilustração do efeito esperado da assimilação de dados na previsão de vazão.....	10
Figura 3. Métodos usados na assimilação de dados. Fonte: Refsgaard (1997).	11
Figura 4. Diagrama de Dispersão mostrando tipos de associação entre duas variáveis X e Y. Fonte: Naghettini & Pinto (2007).	17
Figura 5. Tabela de contingência para um evento dicotômico (Fonte: Wilks, 2006).	18
Figura 6. Exemplos de possíveis resultados da aplicação do SBD e seus significados. Adaptado de Wilks (2006).	24
Figura 7. Exemplo da aplicação do SBD na avaliação de previsões de vazão por conjunto.	25
Figura 8. Elementos de um Diagrama ROC para uma previsão probabilística. Adaptado de Brown (2008).	27
Figura 9. Evolução da destreza das previsões meteorológicas para a altura geopotencial em 500hpa, nas antecedências de 36h e 72h, produzidas pelo NCEP. Fonte: Lynch (2008)....	31
Figura 10. Ilustração esquemática de uma previsão por conjunto. Fonte: Wilks (2006). ...	33
Figura 11. Elementos típicos de uma previsão por conjunto: C é o membro de controle da previsão, que representa a melhor estimativa do estado inicial da atmosfera (linha em vermelho); P ⁺ e P ⁻ representam previsões perturbadas (linhas em azul); M é a média do conjunto (linha em preto) e O é a evolução verdadeira da atmosfera (linha em laranja). Fonte: Kalnay (2003).	34
Figura 12. Ilustração da técnica da previsão hidrológica por conjunto. Adaptado de COMET (2008). Disponível em https://www.meted.ucar.edu/	37
Figura 13. Exemplos de gráficos utilizados para apresentação dos resultados da previsão de cheias por conjunto. Fonte: Pappenberger et al. (2012).	47
Figura 14. Exemplo de um Mapa Espacial de Excedência, mostrando os limites de alerta superados em trechos de rios para previsões por conjunto. Fonte: Younis et al. (2008). ...	48
Figura 15. Exemplo de um Diagrama de Excedência para previsões por conjunto avaliadas em uma seção de medição ou ponto de interesse. Fonte: Younis et al. (2008).	49
Figura 16. Diagrama de atividades da metodologia.	52
Figura 17. Representação da discretização da minibacia em URHs.	53
Figura 18. Balanço de água no solo no modelo MGB-IPH. Adaptado de Collischonn (2001).	54
Figura 19. Dados e operações desenvolvidas na aplicação do modelo MGB-IPH. As caixas em cinza representam a etapa de pré-processamento.	56
Figura 20. Ilustração do método do inverso do quadrado da distância utilizado na interpolação de dados de precipitação.	57
Figura 21. Diagrama esquemático da calibração e validação do modelo hidrológico.	60
Figura 22. Fluxograma simplificado da rotina de previsão de vazões do modelo MGB-IPH.	61
Figura 23. Correção da vazão na rede de drenagem em função da área de drenagem acumulada e do parâmetro <i>ebac</i> . O intervalo de variação do parâmetro <i>ebac</i> entre curvas no gráfico é 0,1.	63
Figura 24. Metodologia para geração das previsões por conjunto.	68
Figura 25. Exemplo de um Diagrama de Excedência utilizado para análise e divulgação dos resultados de previsões por conjunto.	71

Figura 26. Regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco e principais aproveitamentos hidrelétricos. Fonte: Adaptado de Silva (2005).....	73
Figura 27. Mapa de situação da bacia do rio Paraopeba.	74
Figura 28. Perfil longitudinal do rio Paraopeba.	75
Figura 29. Vazões médias mensais na estação fluviométrica Ponte da Taquara (40850000), calculadas com base na série de vazões diárias consistidas entre 1967-2005.....	75
Figura 30. Ajuste da distribuição de Gumbel à série de vazões máximas diárias anuais da estação Ponte da Taquara (40850000).....	76
Figura 31. Precipitação média anual na região da bacia do rio Paraopeba. Fonte: CPRM (2011).	76
Figura 32. Hidrografia da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	78
Figura 33. MDE da bacia do rio Paraopeba.....	78
Figura 34. Mapa de tipos de solo na bacia do rio Paraopeba.	79
Figura 35. Mapa de tipos de solo da bacia do rio Paraopeba reclassificados em função do potencial de geração de escoamento.....	80
Figura 36. Mapa de uso do solo na bacia do rio Paraopeba.	81
Figura 37. Localização dos postos pluviométricos utilizados na aplicação do modelo hidrológico.....	83
Figura 38. Disponibilidade temporal (em nível anual) de dados pluviométricos horários na bacia rio Paraopeba.....	83
Figura 39. Localização dos postos fluviométricos na bacia do rio Paraopeba.....	84
Figura 40. Disponibilidade temporal (em nível anual) de dados de vazão horários na bacia rio Paraopeba.....	85
Figura 41. Localização dos postos pluviométricos convencionais utilizados na validação dos dados de precipitação horários.....	85
Figura 42. Disponibilidade temporal (em nível anual) dos dados de vazão diários na estação fluviométrica convencional Ponte nova do Paraopeba (40800001).	86
Figura 43. Localização das estações climatológicas do INMET utilizadas na pesquisa....	86
Figura 44. Localização das estações de superfície onde são disponibilizadas previsões meteorológicas pelo Laboratório MASTER.....	87
Figura 45. Localização das estações de superfície onde são disponibilizadas previsões meteorológicas na região próxima a bacia do rio Paraopeba.	88
Figura 46. Número de membros do conjunto meteorológico para previsões realizadas às 00:00 UTC no período entre 2008-2011.	89
Figura 47. Distribuição do número de membros do conjunto em função do número de eventos utilizados nas previsões de cheia.....	89
Figura 48. a) Rede de drenagem da bacia do rio Paraopeba. b) Discretização da bacia em minibacias. Os pontos na cor preta em (b) representam os centróides das minibacias.	93
Figura 49. Discretização da bacia do rio Paraopeba em sub-bacias.....	94
Figura 50. Ilustração do procedimento para composição do mapa de URHs.....	95
Figura 51. Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para a bacia do rio Paraopeba.	95
Figura 52. Diagrama de dispersão dos dados médios diários de precipitação integrada sobre a porção da bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita: rede telemétrica <i>versus</i> rede convencional.....	97
Figura 53. Precipitação mensal integrada sobre a bacia do rio Paraopeba definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita obtida através da rede convencional e da rede telemétrica.	97

Figura 54. Comparação entre as séries de vazão diárias obtidas pela rede convencional e através da rede telemétrica na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre jun/2000 a set/2006.....	98
Figura 55. Diagrama de dispersão entre as séries de vazão diárias obtidas através da rede convencional e telemétrica na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre jun/2000 a set/2006.....	99
Figura 56. Comparação entre as séries de vazão diárias obtidas pela rede convencional e através da rede telemétrica na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre out/2006 a jun/2011.....	99
Figura 57. Diagrama de dispersão entre as séries de vazão diárias obtidas através da rede convencional e telemétrica na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre out/2006 a jun/2011.....	100
Figura 58. Hidrogramas observado e calculado no posto Ponte Nova do Paraopeba (Sub-bacia 1), no período de calibração do modelo (01/12/2006 00:00 UTC a 20/06/2011 23:00 UTC). Em detalhe aparecem alguns eventos ocorridos no ano hidrológico 2006-2007. ...	102
Figura 59. Hidrogramas observado e calculado no posto Porto do Mesquita (Sub-bacia 2), no período de calibração do modelo (01/12/2006 00:00 UTC a 20/06/2011 23:00 UTC). Em detalhe aparece o maior evento ocorrido no período, no final do ano de 2008.	102
Figura 60. Hidrogramas observado e calculado no posto Ponte Nova do Paraopeba (Sub-bacia 1), no período de validação do modelo (19/06/2000 00:00 UTC a 30/11/2006 23:00 UTC).....	103
Figura 61. Hidrogramas observado e calculado no posto Porto do Mesquita (Sub-bacia 2), no período de validação do modelo (19/06/2000 00:00 UTC a 30/11/2006 23:00 UTC). ...	103
Figura 62. Porção da bacia do rio Paraopeba definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita.	104
Figura 63. Relação (A_i/A_s) para a bacia do rio Paraopeba em Porto do Mesquita usada no método de assimilação de dados de vazão.....	105
Figura 64. Resultados das previsões de cheia para o posto Porto do Mesquita: (a) Coeficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe; (b) Coeficiente de Persistência; (c) Erro médio e (d) Erro médio quadrático. *configuração de parâmetros do método de assimilação que apresentou o melhor resultado nas previsões. ** demais configurações de parâmetros. ...	107
Figura 65. Vazões calculadas <i>versus</i> previstas para as antecedências de 12h e 72 horas, no cenário com chuva perfeita e com a melhor configuração de parâmetros do método de assimilação de dados.	109
Figura 66. Minibacias e centróides do modelo hidrológico na porção da bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita.	111
Figura 67. Valores médios, máximos e mínimos de H (a), POD (b), RAF (c) e BIAS (d) entre todos os centróides de minibacias, para a previsão de precipitação MSMES-M.	112
Figura 68. Distribuição espacial dos valores de H (a), POD (b), RAF (c) e BIAS (d) para a previsão de precipitação MSMES-M.	113
Figura 69. Valores médios, máximos e mínimos de EM (a) e EMQ (b) entre todos os centróides de minibacias, para a previsão de precipitação MSMES-M.	114
Figura 70. Diagrama de dispersão precipitação observada <i>versus</i> precipitação prevista para a previsão de precipitação MSMES-M.....	115
Figura 71. Valores de EM em função da intensidade de precipitação para a previsão de precipitação MSMES-M.....	115
Figura 72. Distribuição espacial dos valores de EM (a) e EMQ (b) para a previsão de precipitação MSMES-M.....	116
Figura 73. Valores médios, máximos e mínimos de H (a), POD (b), RAF (c) e BIAS (d) entre todos os centróides de minibacias, para a média do conjunto meteorológico.....	117

Figura 74. Distribuição espacial dos valores de H (a), POD (b), RAF (c) e BIAS (d) para a média do conjunto meteorológico.	118
Figura 75. Valores médios, máximos e mínimos de EM (a) e EMQ (b) entre todos os centróides de minibacias, para a média do conjunto meteorológico.	119
Figura 76. Diagrama de dispersão precipitação observada <i>versus</i> precipitação prevista para a média do conjunto meteorológico.....	119
Figura 77. Valores de EM em função da intensidade de precipitação para a média do conjunto meteorológico.	119
Figura 78. Distribuição espacial dos valores de EM (a) e EMQ (b) para a média do conjunto meteorológico.	120
Figura 79. Valores médios de H (a), POD (b), RAF (c), BIAS (d), EM (e) e EMQ (f) entre todos os centróides de minibacias, para as previsões MSMES-M e a média do conjunto meteorológico.	121
Figura 80. Vazões e precipitação média observadas na bacia do rio Paraopeba em Porto do Mesquita entre out/2008 e abr/2011. As linhas tracejadas em cores representam as diferentes vazões limites.....	123
Figura 81. Previsões de cheia no período entre 18/12/2008 e 22/12/2008.....	127
Figura 82. Previsões de cheia no período entre 12/02/2009 a 18/02/2009.....	128
Figura 83. Previsões de cheia no período entre 02/12/2009 e 08/12/2009.....	129
Figura 84. Previsões de cheia no período entre 27/12/2009 e 02/01/2010.....	130
Figura 85. Previsões de cheia no período entre 27/12/2010 e 02/01/2011.....	131
Figura 86. Previsões de cheia no período entre 13/01/2011 e 19/01/2011.....	132
Figura 87. Tamanho da amostra, para diferentes faixas de magnitude de vazões, no período entre out/2008 e abr/2011.	133
Figura 88. Resultados das previsões com a média do conjunto hidrológico para diferentes faixas de magnitude de vazões observadas: (i) Coeficiente de Nash-Sutcliffe; (ii) Coeficiente de Persistência; (iii) Erro Médio; e (iv) Erro Médio Quadrático.	134
Figura 89. Comparação entre os resultados das previsões com a média do conjunto hidrológico (linha em preto), com a previsão MSMES-H (linha em vermelho) e com as previsões com chuva zero (linha em azul) e com chuva perfeita (linha em verde) para faixas de magnitude de vazão observadas superiores a Q20% (177m ³ /s).	136
Figura 90. Comparação dos resultados das previsões com o conjunto médio e cada um dos membros do conjunto hidrológico em termos de CM. Valores positivos indicam melhor desempenho do conjunto médio. Valores negativos indicam melhor desempenho do membro.	137
Figura 91. Diagrama de Dispersão da previsão por conjunto para as antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h.	138
Figura 92. SBD para a previsão por conjunto nas antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h.	140
Figura 93. Proporção das observações captadas no intervalo [0,1] da distribuição da previsão para diferentes faixas de magnitude de vazões.	141
Figura 94. Diagrama ROC para as previsões por conjunto e para as previsões determinísticas – MSMES-H e o conjunto médio - na antecedência de 12h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam, respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis. Os pontos em preto e vermelho representam, respectivamente, a previsão MSMES-H e o conjunto médio.	142
Figura 95. Diagrama ROC para as previsões por conjunto e para as previsões determinísticas – MSMES-H e o conjunto médio - na antecedência de 24h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam, respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis. Os pontos em preto e vermelho representam, respectivamente, a previsão MSMES-H e o conjunto médio.	143

Figura 96. Diagrama ROC para as previsões por conjunto e para as previsões determinísticas – MSMES-H e o conjunto médio - na antecedência de 48h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam, respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis. Os pontos em preto e vermelho representam, respectivamente, a previsão MSMES-H e o conjunto médio.	144
Figura 97. Diagrama ROC para as previsões por conjunto e para as previsões determinísticas – MSMES-H e o conjunto médio - na antecedência de 72h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam, respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis. Os pontos em preto e vermelho representam, respectivamente, a previsão MSMES-H e o conjunto médio.	145
Figura 98. Resultados da previsão por conjunto em termos do Brier Skill Score tendo como referência a previsão MSMES-H. BSSm representa o valor médio de BSS entre todas as antecedências do horizonte de previsão.	146
Figura 99. Diagrama de Excedência para a previsão determinística MSMES-H no período entre 14/12/2008 e 02/01/2009.	148
Figura 100. Diagrama de Excedência da Q1%, para a previsão por conjunto, no período entre 14/12/2008 e 02/01/2009.	149
Figura 101. Diagrama de Excedência para a previsão determinística MSMES-H no período entre 25/12/2010 e 13/01/2011.	151
Figura 102. Diagrama de Excedência da Q1%, para a previsão por conjunto, no período entre 25/12/2010 e 13/01/2011.	152
Figura 103. Diagrama de Excedência para a previsão determinística MSMES-H no período entre 10/01/2011 e 29/01/2011.	154
Figura 104. Diagrama de Excedência da Q2%, para previsão a por conjunto, no período entre 10/01/2011 e 29/01/2011.	155
Figura 105. Diagrama de Excedência para a previsão determinística MSMES-H no período entre 01/03/2011 e 20/03/2011.	157
Figura 106. Diagrama de Excedência da Q2%, para a previsão por conjunto, no período entre 01/03/2011 e 20/03/2011.	158
Figura 107. Média e quantis de 10% e 90% dos valores do Brier Skill Score para os conjuntos com 50% dos membros (linhas vermelho) e 25% dos membros (linhas em azul), para as 1000 realizações.	160
Figura 108. Balanço de água no solo para cada Unidade de Resposta Hidrológica – URH do modelo MGB-IPH (Fonte: Collischonn, 2001).	178
Figura 109. Metodologia de geração e propagação do escoamento na superfície da minibacia e na rede de drenagem no MGB-IPH.	184
Figura 110. Temperatura Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.	191
Figura 111. Umidade Relativa Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.	191
Figura 112. Insolação Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.	192
Figura 113. Velocidade do Vento Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.	192
Figura 114. Pressão Atmosférica Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.	193
Figura 115. Vazões observadas e simuladas e precipitação média na bacia até Porto do Mesquita no período chuvoso (out-abr) do ano hidrológico 2008-2009.	200
Figura 116. Precipitação observada na bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita no período entre 15/12/2008 e 17/12/2008.	200

Figura 117. Vazões observadas e simuladas e precipitação média na bacia até Porto do Mesquita no período chuvoso (out-abr) do ano hidrológico 2009-2010.....	201
Figura 118. Precipitação observada na bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita no período entre 25/12/2009 e 31/12/2009.....	202
Figura 119. Vazões observadas e simuladas e precipitação média na bacia até Porto do Mesquita no período chuvoso (out-abr) do ano hidrológico 2010-2011.....	203
Figura 120. Precipitação observada na bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita no período entre 25/12/2010 e 31/12/2010.....	203

Lista de Tabelas

Tabela 1. Medidas de precisão usadas na avaliação das previsões determinísticas.	19
Tabela 2. Exemplo de cálculo do Brier Score.	21
Tabela 3. Fração da área total da bacia ocupada pelas classes de solos em função do potencial de geração de escoamento superficial.	80
Tabela 4. Fração da área total da bacia rio Paraopeba ocupada pelas classes de uso.	81
Tabela 5. Postos fluviométricos no rio Paraopeba com dados horários de vazão utilizados na aplicação do modelo MGB-IPH.	84
Tabela 6. Distribuição das áreas das minibacias do modelo hidrológico para a bacia do rio Paraopeba.	93
Tabela 7. Fração das URHs sobre a área total da bacia do rio Paraopeba.	96
Tabela 8. Resultados da calibração e validação do modelo MGB-IPH na bacia do rio Paraopeba.	101
Tabela 9. Limites mínimos e máximos adotados na definição das diferentes configurações de parâmetros avaliadas.	105
Tabela 10. Configurações de parâmetros do método de assimilação de dados que apresentaram os melhores resultados na previsão com chuva perfeita.	106
Tabela 11. Vazões limites adotadas para avaliação das previsões de cheias.	122
Tabela 12. Maiores eventos de cheia ocorridos nos anos hidrológicos entre 2008 e 2011.	124
Tabela 13. Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH. (Fonte: FAN, 2011).	176
Tabela 14. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. (Fonte: FAN, 2011).	177
Tabela 15. Postos pluviométricos (rede telemétrica) utilizados na aplicação do modelo MGB-IPH na bacia do Paraopeba.	185
Tabela 16. Postos pluviométricos convencionais da ANA utilizados na validação dos dados horários.	186
Tabela 17. Estações meteorológicas do INMET com dados de normais climatológicas utilizadas.	190
Tabela 18. Características dos modelos meteorológicos utilizados na pesquisa.	195
Tabela 19. Albedo para a bacia do rio Paraopeba.	196
Tabela 20. Índice de Área Foliar (IAF) para a bacia do rio Paraopeba.	196
Tabela 21. Altura média da vegetação para a bacia do rio Paraopeba.	196
Tabela 22. Resistência superficial em boas condições de umidade do solo para a bacia do rio Paraopeba.	197
Tabela 23. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH para a Subacia 1 – Estação Ponte Nova do Paraopeba.	198
Tabela 24. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH para a Subacia 2 – Estação Porto do Mesquita.	198
Tabela 25. Resultados de POD e POFD para as antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h, para todas as vazões limites, para as previsões MSMES-H, a média do conjunto e o 1°, 5° e 9° decis do conjunto.	204

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A	área de drenagem acumulada na minibacia
A_s	área de drenagem acumulada na minibacia de exutório da sub-bacia
ANA	Agência Nacional de Águas
AR	<i>Auto-Regressive model</i>
ARIMA	<i>Auto-Regressive Incremental Moving Average model</i>
ARMA	<i>Auto-Regressive Moving Average model</i>
BS	Brier Score
BS_p	Brier Score para a previsão principal
BS_{perf}	Brier Score para a previsão perfeita, igual a zero
BS_{ref}	Brier Score para a previsão de referência
BSS	Brier Skill Score
bx	parâmetro de atualização dos reservatórios conceituais do modelo hidrológico
CAMS	<i>Climate Assessment and Monitoring System</i>
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais
CMA	<i>China Meteorological Administration-CMA</i>
CMC	<i>Canadian Meteorological Centre</i>
CP	Coefficiente de Persistência
CPRM	Serviço Geológico do Brasil - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
d	distância euclidiana do posto pluviométrico ao centróide da minibacia na interpolação pelo método IDW
DD	Diagrama de Dispersão
DWD	<i>German National Weather Service</i>
D-PHASE	<i>Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood events in the Alpine region</i>
$ebac$	parâmetro do método de assimilação de dados
ECMWF	<i>European Center for Medium Range Weather Forecasting</i>
EFAS	<i>European Flood Alert System</i> - Sistema Europeu de Alerta de Cheias
EM	erro médio
EMQ	erro médio quadrático (<i>root mean square error</i>)
$emqM$	erro médio quadrático
$emqMV$	erro médio quadrático subtraído do viés médio
EPS	<i>Ensemble Prediction System</i> - Sistema de Previsão por Conjunto
\hat{F}	quantil da distribuição da previsão conjunto correspondente a um determinado valor observado
FCA	fator de correção do método de assimilação de dados do modelo MGB-IPH

<i>H</i>	Taxa de Acerto
H-EPS	<i>Hydrological Ensemble Prediction System</i>
HEPEX	<i>Hydrologic Ensemble Prediction Experiment</i>
<i>i</i>	intervalo de tempo da simulação ou antecedência da previsão
<i>I</i>	janelas ou intervalos fixos <i>I</i> definidos a partir da distribuição de probabilidades da previsão
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo-USP
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i> – Inverso do Quadrado da Distância
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>k</i>	minibacia considerada no método de assimilação de dados
<i>L</i>	antecedência da previsão
LNCC	Laboratório Nacional de Computação Científica
LEPS	<i>Limited-Area Ensemble Prediction System</i>
<i>m</i>	modelo meteorológico considerado no cálculo das medidas de desempenho da previsão MSMES
MAP	<i>Mesoscale Alpine Program</i>
MASTER	Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MOGREPS	<i>Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System</i>
MSC	<i>Meteorological Center of Canada</i>
MSMES	previsão meteorológica determinística do Laboratório MASTER;
MSMES-M	previsão meteorológica determinística do Laboratório MASTER da variável de precipitação
MSMES-H	previsão hidrológica determinística, obtida a partir da previsão de precipitação MSMES-M
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration's</i>
NCEP	<i>US National Centers for Environmental Prediction</i>
<i>N</i>	número de valores no cálculo das medidas de desempenho
<i>nm</i>	número total de modelos
<i>NS</i>	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
<i>NSlog</i>	Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões
<i>o</i>	valor observado da variável
\bar{o}	valor médio das observações
<i>observado</i>	variável observada
<i>P</i>	precipitação observada nos postos pluviométricos
<i>PB</i>	fração da vazão na rede de drenagem originária do reservatório conceitual do modelo
<i>PBlim</i>	fração mínima de água necessária para que haja a correção dos reservatórios conceituais
<i>Pc</i>	precipitação interpolada para o centroide da minibacia
<i>p</i>	valor previsto da variável
POD	Probabilidade de Detecção
POFD	Probabilidade de Falsa Detecção ou Taxa de Alarme Falso
<i>pp</i>	probabilidade de ocorrência da previsão

p_o	probabilidade de ocorrência da observação
<i>previsto</i>	variável prevista
PNT	Previsão Numérica do Tempo
P_{tot}	extensão do período onde é realizada a avaliação do desempenho dos modelos, igual a 15 dias
Q_{at}	valor atualizado da vazão na rede de drenagem na minibacia
Q_o	vazões observadas
Q_{obs}	vazões observadas
Q_{calc}	vazões calculadas pelo modelo
Q_c	vazões calculadas pelo modelo
$\overline{Q_o}$	média das vazões observadas
Q20%, Q5%, Q2% e Q1%	vazões limites que representam os quantis de 80%, 95%, 98% e 99% da série de dados horários de vazão observados
r	Coefficiente de Correlação
RAF	Razão de Alarme Falso
RFC	<i>Nevada River Forecast Center</i>
ROC	<i>Relative Operating Characteristic</i> ou <i>Receiver Operating Characteristic</i>
s	minibacia exutório da sub-bacia onde existe um posto fluviométrico com dados de vazão para correção das variáveis de estado do modelo hidrológico
S1	erro relativo no gradiente horizontal da altura geopotencial a 500 hpa
SBD	<i>Spread-Bias Diagram</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
t_0	intervalo de tempo da realização da previsão
t_a	intervalo de tempo durante o qual é feita a comparação entre valores calculados e observados
TIGGE	<i>THORPEX Interactive Grand Global Ensemble</i>
THORPEX	<i>The Observing-System Research and Predictability Experiment</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UKMO	<i>UK Meteorological Office</i>
USP	Universidade de São Paulo
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
VB	volume calculado do reservatório conceitual na minibacia
$VBat$	volume atualizado no reservatório conceitual na minibacia
$viesM$	viés médio
x_i^0	observação associada a previsão i
ΔV	erro de volume dos hidrogramas

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização e justificativa

Dentre todos os tipos de desastres naturais, as inundações figuram entre os que causam maiores impactos em termos socioeconômicos à população mundial (Moore et al., 2005; Sene, 2008). Estima-se que as inundações sejam responsáveis por mais de um terço das perdas econômicas e por cerca de dois terços do número total de pessoas afetadas por desastres naturais (UN, 2004). De acordo com o Banco de Dados Internacional de Desastres EM-DAT (CRED, *Université Catholique de Louvain, Brussels*, www.emdat.be/, 2012), o Brasil está entre os dez países mais atingidos por inundações.

As inundações têm origem em uma série de fatores, dentre os quais se podem citar a alteração no uso do solo na bacia hidrográfica – e.g. impermeabilização e o desflorestamento – e, principalmente, o processo de urbanização, que levou a ocupação de áreas naturalmente inundáveis. Acresce-se a essas questões possíveis impactos ocasionados pela mudança/variabilidade climática no aumento da frequência de eventos de chuvas intensas.

A ocorrência de cheias com impactos severos registrados recentemente em âmbito global (e.g. Werner et al., 2005; Moore et al., 2005; Plate, 2007; Sene, 2008; Thielen et al. 2009; Ramos et al. 2011; He et al.; 2011), inclusive no Brasil, tem demonstrado o alto grau de exposição da sociedade ao fenômeno. Historicamente, a minimização dos impactos tem sido idealizada através de intervenções estruturais pontuais na bacia, como o aumento da capacidade dos rios, a construção de diques e de reservatórios. Embora esse tipo de medida contribua na redução da vulnerabilidade da região protegida, sempre existe a chance de superação do risco considerado no projeto da estrutura. Essas e outras questões têm aumentado, cada vez mais, o interesse dos mais diversos segmentos da sociedade por medidas que permitam antecipar eventos extremos de cheia, contribuindo na redução de seus impactos em termos de vidas humanas e danos à propriedade.

Sistemas de alerta de cheias tem sido reconhecidos como uma das medidas mais efetivas na minimização dos impactos causados por cheias (UN, 2004; Shrestha et al., 2008). A partir dos alertas emitidos pelo sistema, planos de ação podem ser executados visando à evacuação da população de áreas vulneráveis a inundações. De modo geral, podem-se distinguir quatro etapas na

emissão de um alerta de cheia (Werner et al., 2005; Sene, 2008): a) Detecção: a partir dos dados observados via rede telemétrica, radares meteorológicos, satélites e de previsões meteorológicas são monitoradas as condições atuais da atmosfera, dos rios na bacia e a possibilidade de ocorrência de eventos hidrometeorológicos impactantes; b) Previsão de cheias: detectada a possibilidade de ocorrência de um evento importante, são realizadas previsões hidrológicas para determinar eventuais superações de vazão ou níveis de alerta em pontos específicos na bacia, para uma determinada antecedência; c) Disseminação: subsidiado pelas informações obtidas nas duas primeiras etapas (a e b) é tomada a decisão sobre a emissão do alerta as autoridades/instituições envolvidas; e d) Resposta: são executadas ações de mitigação dos impactos, tais como evacuação da população ou mudança da regra de operação de estruturas hidráulicas como reservatórios na região. Outra atividade importante nesse contexto diz respeito à avaliação periódica do desempenho de cada uma das etapas acima descritas, visando o aperfeiçoamento contínuo e a efetividade de todas as operações do sistema.

Um dos principais elementos de um sistema de alerta de cheias é o sistema de previsão hidrológica. A previsão hidrológica tem por objetivo diminuir as incertezas a respeito das condições futuras do rio em pontos considerados vulneráveis a inundações, subsidiando, em conjunto com outras informações, a tomada de decisão pela emissão de alertas. Um dos métodos tipicamente utilizados para previsão de vazões é o que utiliza modelos chuva-vazão, que tem como principal dado de entrada a precipitação observada em tempo real e/ou prevista. A precipitação observada em tempo real normalmente é obtida via rede telemétrica *in situ*, e, mais recentemente, como fonte alternativa, através sensores remotos como radares e satélites meteorológicos.

Quando se deseja uma antecedência maior que o tempo de concentração da bacia, é possível ampliar o horizonte da previsão através do uso integrado de modelos chuva-vazão e previsões quantitativas de precipitação (QPF), tipicamente derivadas de meteorológicos. A QPF tem sido colocada como um ponto chave na previsão de cheias, especialmente em pequenas e médias bacias (e.g. Toth et al., 2000; Bacchi & Ranzi, 2003; Xuan et al., 2009; Hapuarachchi et al., 2011), onde a ampliação da antecedência da previsão pode promover alertas antecipados, permitindo a adoção de medidas de mitigação dos impactos em tempo útil. Entretanto, embora seja útil, a QPF ainda apresenta erros consideráveis na escala das aplicações hidrológicas, sendo considerada uma das principais fontes de incerteza na previsão de cheias. A natureza caótica da atmosfera, a sensibilidade dos modelos meteorológicos às condições iniciais e a complexidade dos processos envolvidos na determinação da QPF a tornam uma das variáveis menos precisas resultantes da previsão numérica do tempo (Ebert, 2000; Habets et al., 2004; Davolio et al., 2008).

A previsão por conjunto é uma técnica que procura explorar as incertezas associadas às condições iniciais e/ou deficiências na estrutura dos modelos meteorológicos. A partir de diferentes

modelos meteorológicos ou de condições iniciais diferentes de um único modelo, são gerados um conjunto de previsões, onde cada cenário representa uma possível trajetória dos processos atmosféricos ao longo do horizonte de previsão. Pesquisas recentes, principalmente na Europa e Estados Unidos, tem mostrado resultados promissores do acoplamento de previsões meteorológicas por conjunto a modelos hidrológicos para realizar previsões de cheia para horizontes de até 10 dias (Pappenberger et al., 2005; Younis et al., 2007; Pappenberger et al., 2008; Thiemig et al., 2010; Voisin et al., 2011). O conjunto de previsões obtido permite representar uma faixa de possíveis cenários de cheia, e a quantificação das incertezas ou da probabilidade de ocorrência associada a esses cenários tem sido colocada como útil na diminuição da emissão de falsos alertas, evitando assim a perda de credibilidade dos sistemas de alerta de cheia (Pappenberger et al., 2008).

Como prática recente, no entanto, existem ainda grandes desafios a serem superados na aplicação da previsão de cheias por conjunto, que incluem (Cloke & Pappenberger, 2009; Ramos et al., 2010): a) melhora no desempenho das previsões meteorológicas; b) compreensão da incerteza total no sistema de previsão, incluindo as incertezas nos dados de entrada e do modelo hidrológico; c) ampliação do número de estudos de caso na aplicação da técnica - eventos de cheia de grande magnitude são pouco frequentes; d) aplicação de métodos de assimilação de dados na previsão hidrológica, e; e) comunicação da incerteza dos resultados das previsões por conjunto.

No contexto brasileiro, praticamente inexitem pesquisas relacionadas à previsão de cheias por conjunto em curto prazo, salvo raras exceções. Entretanto, previsões meteorológicas por conjunto vêm sendo produzidas operacionalmente pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos-CPTEC/INPE desde 2001 (Machado et al., 2010) e previsões por conjunto envolvendo diferentes modelos têm sido produzidas e avaliadas pelo Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais - MASTER (Silva Dias et al., 2006). Nesse sentido, a investigação do benefício da abordagem probabilística na previsão de cheias pode contribuir no desenvolvimento futuro de sistemas que permitam a emissão de alertas mais confiáveis e com maior antecipação, considerando as especificidades físicas e climáticas do Brasil. No presente trabalho é proposta e avaliada uma metodologia para previsão de cheias por conjunto, que emprega a modelagem conceitual distribuída, dados de monitoramento hidrológico em tempo real e um conjunto de previsões de precipitação, aplicada a uma bacia de médio porte na região sudeste do Brasil, a bacia do rio Paraopeba.

1.2 Objetivos

Essa pesquisa tem como objetivo principal avaliar o benefício da incorporação da previsão meteorológica por conjunto à modelagem chuva-vazão conceitual na previsão de cheias em curto prazo, utilizando ferramentas e dados disponíveis em modo operacional no Brasil. Como parâmetro de referência nessa avaliação é utilizada uma previsão hidrológica única, que usa como dados de entrada uma previsão meteorológica determinística, resultante da combinação ótima de saídas de diferentes modelos meteorológicos, com diferentes condições iniciais e parametrizações.

1.3 Estrutura do texto

O texto está dividido em 8 capítulos. No Capítulo 2 são apresentados conceitos e definições utilizadas na previsão de vazões, tipos de modelos e possíveis composições entre procedimentos, dados e modelos que podem ser utilizadas na previsão de vazões em tempo real. Nesse capítulo é ainda apresentada uma compilação dos diferentes métodos de assimilação de dados utilizados na previsão hidrológica e, por fim, medidas de desempenho usadas na verificação dessas previsões.

No Capítulo 3 são apresentadas, sucintamente, algumas das potenciais fontes de dados de precipitação para previsão hidrológica, com destaque para a previsão de precipitação, modelos de previsão numérica do tempo e da abordagem probabilística na previsão meteorológica.

O Capítulo 4 introduz o tema previsão de cheias por conjunto, apresentando um histórico, conceitos e algumas aplicações recentes selecionadas da literatura.

No Capítulo 5 é apresentada a metodologia da pesquisa e no Capítulo 6, a descrição do estudo de caso e dos dados disponíveis.

O Capítulo 7 apresenta a aplicação da metodologia ao estudo de caso e os resultados obtidos.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões e recomendações da pesquisa.

Capítulo 2

Previsão de Vazões

2.1 Aspectos gerais

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 na gestão dos recursos hídricos (Tucci & Collischonn, 2003). Alguns exemplos de aplicação da previsão de vazões são: operação de obras hidráulicas como reservatórios, produção de energia, abastecimento de água, irrigação para agricultura, navegação e controle de cheias.

No Brasil o uso preponderante das previsões de vazão tem sido no setor elétrico, onde são usadas para planejamento e operação de reservatórios de geração de energia. Sua utilização em sistemas de alerta de enchentes ainda é incipiente, dificultada pela limitada disponibilidade de dados de vazão e precipitação em tempo real com resolução temporal e espacial adequadas. Talvez um dos poucos exemplos no cenário brasileiro seja o Sistema de Alerta Contra Enchentes do Rio Doce, operado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). O sistema, operado desde 1997, beneficia cerca de 15 municípios localizados nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, alertando quanto ao risco de ocorrência de cheias (Pinto et al., 2005). Atualmente destaca-se a ação da ANA em parceria com a CPRM e outras instituições, no sentido de ampliar a cobertura da rede de monitoramento hidrometeorológico em tempo real e de apoiar na criação de centros estaduais para prevenção de eventos críticos de cheias e secas – as Salas de Situação-, abrindo uma perspectiva futura para implantação de novos sistemas de previsão de vazões em território brasileiro.

2.2 Definições e conceitos na previsão de vazões

Conceitualmente, a previsão de vazões consiste na estimativa de valores futuros de vazão, em determinado local de um curso d'água na bacia hidrográfica, com definida antecedência temporal. Duas características inerentes à previsão são importantes: a frequência e o horizonte. A frequência da previsão define o período de tempo no qual são emitidos novos dados de previsão (Bravo, 2006) e o horizonte define o tempo à frente no qual se estendem as previsões. É importante

distinguir também a previsão de vazões da predição. Esta última representa uma estimativa futura, sem referência a um período de tempo específico (Lettenmaier & Wood 1993; Anderson & Burt, 1985). Um exemplo de predição é a probabilidade de ocorrência de uma determinada vazão em uma seção de um rio obtida a partir da análise da série histórica no local.

Quanto ao horizonte, a previsão de vazões pode ser basicamente classificada em dois tipos: de curto ou longo prazo. Collischonn & Tucci (2005) consideram a previsão de curto prazo aquela realizada com antecedência de horas ou alguns dias. A previsão de longo prazo envolve a previsão com antecedência de semanas ou meses e é muitas vezes chamada de previsão sazonal.

A previsão de curto prazo, também chamada de previsão em tempo real ou previsão em tempo atual, pode ocorrer continuamente no tempo ou em épocas predefinidas do ciclo hidrológico, visando à caracterização de uma situação específica do corpo d'água (Tucci, 2005). Assim, a previsão de cheias em tempo real é um caso particular da previsão de vazões de curto prazo, onde o objetivo principal é a previsão de vazões durante o período chuvoso na bacia.

A previsão de vazões pode ser ainda classificada como determinística ou probabilística. Uma previsão determinística apresenta uma solução única para a variável prevista para cada intervalo de tempo da previsão. A previsão probabilística, por outro lado, apresenta para cada intervalo de tempo, a distribuição de probabilidades da variável prevista obtida a partir de um conjunto de possíveis soluções resultantes da aplicação da técnica da previsão por conjunto.

2.3 Modelos para previsão de vazões

Várias metodologias envolvendo modelos matemáticos têm sido propostas para previsão de vazão ao longo das últimas décadas. De modo geral, esses modelos podem ser caracterizados como empíricos ou caixa-preta, conceituais ou de base física. De acordo com Tucci (2005), os modelos empíricos se baseiam em relações empíricas entre variáveis, sem considerar nenhum conceito físico dos processos hidrológicos. Incluem-se nessa classificação os modelos estocásticos, modelos de regressão simples ou múltipla entre variáveis e modelos empíricos não lineares como redes neurais artificiais e de lógica difusa.

Os modelos conceituais procuram representar os processos hidrológicos dominantes através de equações baseadas nos processos físicos envolvidos, embora muitas vezes possuam parâmetros sem interpretação física direta. Ocupam uma posição intermediária entre os modelos empíricos e os de base física. Segundo Tucci (1998), uma das vantagens da utilização desse tipo de abordagem em relação aos modelos empíricos é permitir a simulação de cenários diferentes daqueles usados na calibração - extrapolação - com maior consistência metodológica, característica desejada na simulação de eventos extremos de cheias.

De acordo com Silva (2005), os modelos hidrológicos conceituais geralmente possuem dois componentes ou módulos principais: (a) chuva-vazão: transforma a precipitação em vazão através da representação do balanço de água no solo e geração de escoamento, incluindo processos como a interceptação, infiltração, evapotranspiração, escoamento subterrâneo, superficial e subsuperficial e, (b) propagação em rios e reservatórios: é simulado o escoamento em trechos de rios e reservatórios a partir da contribuição da bacia obtida do módulo anterior, descrito em (a).

Nos modelos de base física os vários componentes do ciclo hidrológico estão integrados e os processos de transporte são representados por equações diferenciais parciais da conservação da massa, movimento e energia (Beven et al, 1980; Feyen et al., 2000). Esses modelos foram concebidos tendo como premissa a possibilidade de coletar todas as informações necessárias pelo modelo diretamente do campo ou laboratório, sem a necessidade de calibração de seus parâmetros (Beven, 2006).

Por fim, os modelos podem ainda ser classificados como distribuídos ou concentrados. Os modelos distribuídos, ao contrário dos concentrados, permitem considerar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos e das variáveis de entrada. Em compensação, necessitam um número significativamente maior de informações a respeito das características da bacia para a simulação dos processos. As unidades usuais de discretização da bacia podem ser sub-bacias ou células quadradas. Alguns exemplos de modelos distribuídos são o VIC-2L (Liang et al., 1994), o MIKE SHE (Refsgaard & Storm, 1995) e, no cenário brasileiro, o MGB-IPH (Collischonn, 2001).

2.3.1 Procedimentos para previsão de vazões em tempo real

Dependendo do objetivo da previsão, das características físicas da bacia e dos dados disponíveis, diferentes metodologias podem ser usadas para previsão em curto prazo ou em tempo real. Tucci (2005) apresenta um apanhado geral das composições entre procedimentos, dados e modelos que podem ser utilizados, além dos resultados esperados. Algumas dos principais alternativas são (adaptado de Tucci, 2005):

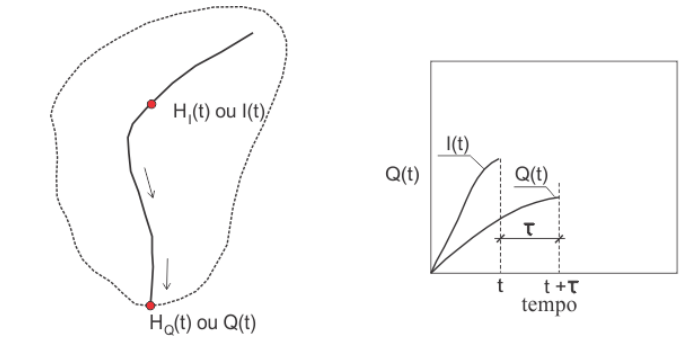
(a) Previsão de vazões ou níveis com base em valores observados em rios à montante e seus afluentes (Figura 1(a)) : no caso de grandes bacias ($>10.000\text{km}^2$), onde os tempos de translação da onda de cheia no canal são relativamente grandes, a observação de nível ou vazão a montante pode ser utilizada para se efetuar a previsão. Possíveis métodos aplicáveis nesse caso são modelos de regressão simples de variáveis como o nível ou vazão entre diferentes postos fluviométricos ou ainda modelos baseados essencialmente na propagação do hidrograma de cheias observado a montante do local de interesse. A principal vantagem desse tipo de método colocada pelo autor é que os erros de previsão são menores que o da previsão com um modelo chuva-vazão. No entanto, esta situação somente pode ser utilizada quando o tempo de deslocamento no canal atende aos

objetivos da previsão e a contribuição lateral entre os postos não é mais importante que o volume da bacia do posto de montante;

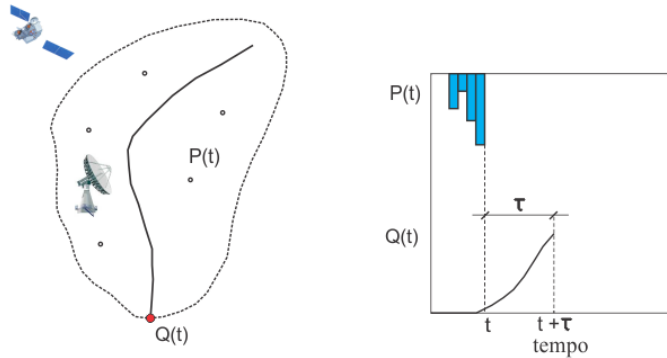
(b) Estimativa de precipitação com base na rede telemétrica e transformação em vazão com modelo hidrológico (Figura 1(b)): Nessa alternativa, são utilizados modelos hidrológicos chuva-vazão tendo como dado de entrada a precipitação observada em tempo real. A precipitação observada normalmente é obtida via rede telemétrica, e, mais recentemente, como fonte alternativa, através de estimativas de sensores remotos como radares e satélites meteorológicos. O uso exclusivo da precipitação observada ou estimada, no entanto, limita o horizonte de previsão a um tempo da ordem do tempo de concentração da bacia;

(c) Previsão meteorológica de precipitação integrada ao modelo chuva-vazão (Figura 1(c)): Nessa conjuntura é obtida a maior antecedência possível na previsão de vazões, entretanto erros maiores nas previsões são esperados devido a incerteza introduzida pela QPF no processo. Esse tipo de combinação é útil, sobretudo, em médias e pequenas bacias (1.000 - 10.000km²), onde o tempo entre o início da chuva e a ocorrência dos eventos hidrológicos é de algumas horas a poucos dias. É importante ressaltar que a utilização da precipitação prevista não dispensa, totalmente, a necessidade de dados observados em tempo real, que podem ser usados na definição e atualização das condições iniciais do modelo hidrológico através de métodos de assimilação de dados; e

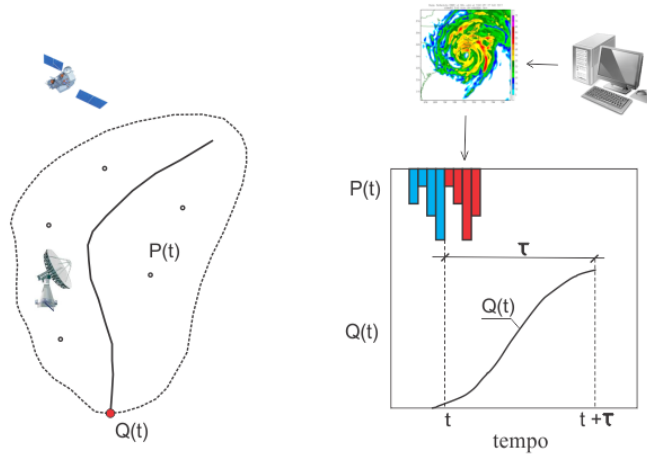
(d) Previsão da vazão com base nos níveis ou vazões observados à montante e uso de telemetria, radar, satélite e/ou previsão de precipitação para a bacia de contribuição lateral (Figura 1(d)): Essa alternativa contempla a defasagem do deslocamento do hidrograma de cheia observado à montante obtido com a alternativa (a) e a rapidez da contribuição lateral mais próxima a seção principal da bacia através de uma das alternativas descritas em (b) ou (c).



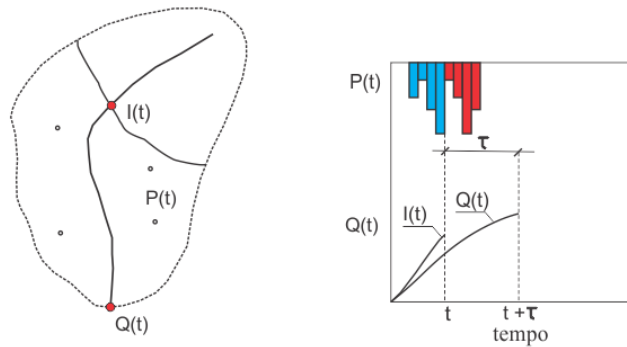
a) previsão com base no nível ou vazão



b) previsão com base na chuva observada



c) previsão com base na chuva prevista



d) previsão com base na chuva observada e/ou prevista e vazão observada a montante

Figura 1. Tipos de procedimentos, dados e modelos que podem ser utilizados na previsão de vazões em tempo real. Adaptado de Tucci (2005).

2.4 Assimilação de dados

Um dos inconvenientes que surgem quando se utiliza um modelo chuva-vazão para previsão de cheias em tempo real é que o valor estimado pelo modelo no instante de realização da previsão normalmente é diferente daquele observado, o que acaba por degradar as previsões já nos primeiros intervalos de tempo de previsão. Esse desvio se deve a diversos fatores, como: erros nos dados de entrada, deficiência na representação dos processos físicos pelo modelo, erros na calibração do modelo, mudanças nas características da bacia ao longo do tempo ou ainda erros nos dados observados na estação de monitoramento (Serban & Askew, 1991; Srikanthan et al., 1994).

Existindo dados observados de vazão ou nível em tempo real, é possível aproximar o comportamento do modelo à resposta do sistema observada em campo, procedimento conhecido como assimilação de dados ou atualização do modelo. Embora alguns autores façam distinção entre os termos assimilação e atualização, nesse texto essas denominações serão usadas como sinônimos.

Madsen & Skotner (2005) definem a assimilação ou atualização do modelo como um processo de retroalimentação onde a previsão é condicionada às observações no rio, utilizadas para corrigir as condições iniciais do modelo. Embora o nível d'água ou a vazão sejam as variáveis mais utilizadas neste processo (Kahl & Nachtnebel, 2008; Divac et al., 2009), outras variáveis como temperatura, umidade do solo (e.g. Crow & Ryu, 2009) e o fluxo latente de calor (e.g. Schurmans et al., 2003) também podem ser utilizadas. A Figura 2 mostra o efeito esperado da assimilação de dados na previsão de vazões.

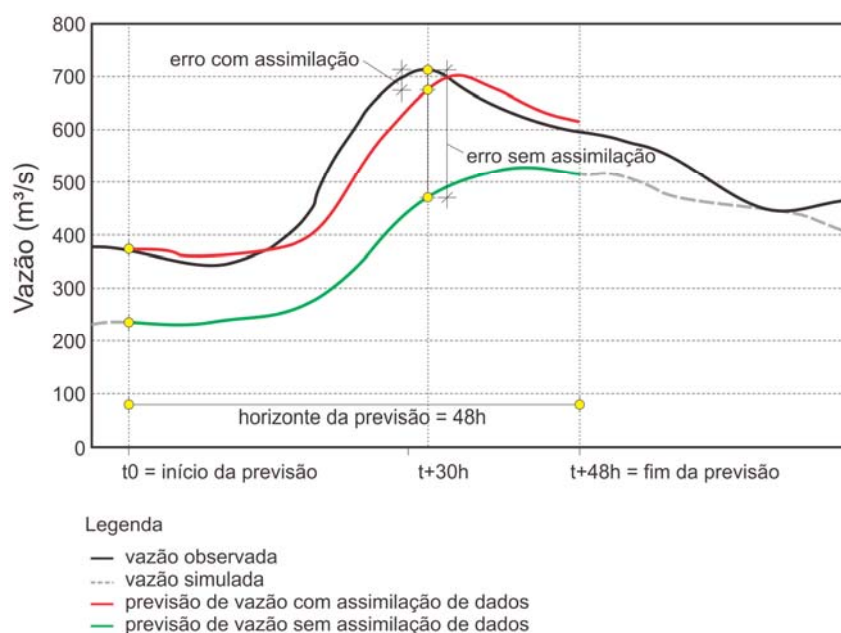


Figura 2. Ilustração do efeito esperado da assimilação de dados na previsão de vazões.

Na previsão em tempo real são usadas duas terminologias que indicam o modo no qual o modelo está operando. Quando as previsões de vazões são realizadas empregando-se alguma técnica de assimilação, são utilizados os termos “modo de previsão”, “modo atualização” ou operando “on-line”. Caso contrário, diz-se que o modelo está em “modo de simulação” ou operando “off-line” (Xiong & O’Connor, 2002; Moore, 2007; Sene, 2008).

Os métodos de assimilação de dados na previsão hidrológica são organizados em quatro categorias principais (O’Connell & Clarke, 1981; Refsgaard, 1997): (a) atualização das variáveis de entrada, (b) atualização das variáveis de estado, (c) atualização dos parâmetros do modelo, e (d) atualização das variáveis de saídas. A Figura 3 mostra, esquematicamente, como cada um desses métodos interage com o modelo e em qual etapa da previsão hidrológica são aplicados.

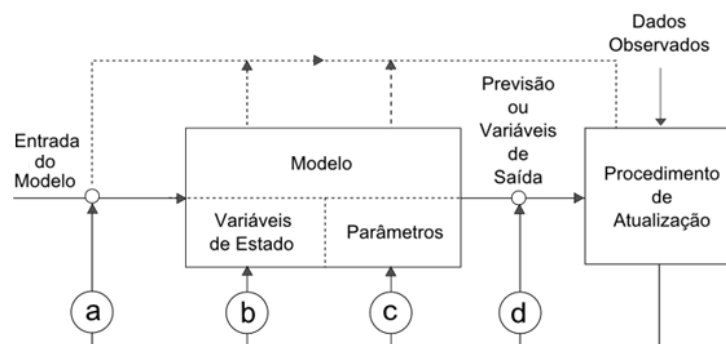


Figura 3. Métodos usados na assimilação de dados. Fonte: Refsgaard (1997).

No item a seguir são descritos com maior detalhe os métodos de assimilação de dados.

2.4.1 Atualização das variáveis de entrada

Nessa técnica os dados de entrada são modificados de modo que as variáveis de saída do modelo, no instante ou período anterior ao início da previsão, se aproximem dos dados observados. A aplicação dos métodos que pertencem a essa categoria se sustenta no fato das incertezas nos dados de entrada serem frequentemente dominantes sobre os erros da previsão (Refsgaard, 1997; Kahl & Nachtnebel, 2008).

A maior parte desse tipo de procedimento é baseada em algoritmos de tentativa e erro (Srikanthan et al., 1994; Serban & Askew, 1991), sendo as variáveis de entrada normalmente utilizadas a precipitação e a temperatura. As etapas mais importantes no procedimento, observadas por Serban & Askew (1991), são:

- (a) determinação do erro entre os hidrogramas medidos e simulados;
- (b) comparação com um erro aceitável, pré-definido;

(c) seleção das variáveis de entrada a serem ajustadas, além do incremento de ajuste para cada variável e o número máximo de iterações permitido;

(d) repetição do processo com o modelo usando as variáveis de entrada ajustadas.

Alguns autores chamam a atenção para algumas desvantagens ou inconsistências dos métodos que pertencem a essa categoria. A existência de um número grande de variáveis de entrada consideradas, por exemplo, pode tornar a atualização um problema de otimização bastante complexo (Divac et al., 2009). Kahl & Nachtnebel (2008) comentam que a utilização desse método, no caso da precipitação, está condicionada à ocorrência de precipitação nos instantes anteriores à previsão.

2.4.2 Atualização das variáveis de estado

As condições iniciais do modelo são corrigidas através de algumas de suas variáveis de estado para se obter uma melhor correspondência entre os dados observados e calculados no início da previsão. O termo “estado” é usado para descrever uma variável do modelo que se situa em um estágio entre a entrada e a saída do modelo (Szollosi-Nagy, 1976 *apud* Moore, 2007).

A técnica se fundamenta na hipótese que os erros presentes nos dados de entrada dos modelos chuva-vazão se acumulam e aparecem nas variáveis definidas a partir de reservatórios conceituais, elementos que tipicamente são parte da estrutura desses modelos (Srikanthan et al., 1994; Serban & Askew, 1991). Para Sene (2010) esta abordagem tende a ser mais desafiadora quando aplicada à modelagem chuva-vazão distribuída porque os erros da previsão nas estações de monitoramento precisam ser distribuídos sobre toda a região simulada.

A assimilação das variáveis de estado do modelo pode ser realizada basicamente de duas maneiras: por procedimentos empíricos ou métodos envolvendo o filtro de Kalman. Nos métodos empíricos as variáveis observadas - normalmente a vazão - são usadas para determinar o erro cometido pelo modelo no instante de realização da previsão. Esse erro pode ser expresso na forma de um fator de ajuste, utilizado para corrigir os valores das variáveis de estado do modelo (Moore, 2007). Exemplos de métodos empíricos são apresentados nos trabalhos de Wöhling et al.(2006), Paz et al. (2007), Moore (2007) e Meller et al. (2012).

Abordagens utilizando o Filtro de Kalman ou variantes desse método tem se tornado bastante utilizadas na atualidade, podendo-se citar os trabalhos de Madsen & Stokner (2005) e Xie & Zhang (2010). De acordo com Moore (2007), nessa abordagem, os fatores de ajuste das variáveis de estado do modelo são estimados de acordo com as incertezas relativas do modelo e da variável observada, para cada uma das variáveis de estado consideradas, tendendo a ser mais complexa e adequada a sistemas lineares. Dessa forma o autor coloca que não há garantias que metodologias

que utilizam o Filtro de Kalman produzam melhores resultados que procedimentos empíricos em sistemas que apresentam não linearidade nos processos, como os observados tipicamente na previsão hidrológica. Lauzon et al. (1997) testaram dois métodos de assimilação de dados aplicados a previsão com um modelo conceitual na bacia do Rio Lac-Saint-Jean (Québec, Canadá). A análise dos resultados mostrou que um procedimento simples e objetivo de assimilação de dados apresentou melhor desempenho que a aplicação do Filtro de Kalman.

As variáveis de estado mais comumente utilizadas na atualização de modelos hidrológicos são: a área de cobertura da neve, a profundidade da camada de neve, a umidade do solo ou a quantidade de água armazenada nos reservatórios conceituais do modelo, que representam o armazenamento de água nas camadas superficial, zonas saturadas e não-saturadas (Serban & Askew, 1991; Divac et al. 2009).

2.4.3 Atualização dos parâmetros

Nesta técnica de assimilação de dados os valores mais recentes de vazões ou níveis observados são utilizados para iniciar uma nova fase de calibração dos parâmetros do modelo, podendo ser usados algoritmos de otimização automática para esse fim. Os procedimentos que pertencem a essa categoria têm sido pouco utilizados na modelagem chuva-vazão conceitual (Sene, 2008; Divac et al., 2009), embora tenham aplicabilidade reconhecida no caso de modelos autorregressivos ou de redes neurais artificiais.

A atualização dos parâmetros do modelo tem sido alvo de críticas por diversos autores. Serban & Askew (1991), por exemplo, comentam o problema da existência de interdependência entre parâmetros, observada na maior parte dos modelos. Isso significa, em termos gerais, que a modificação de um parâmetro se reflete na necessidade de modificação de outros parâmetros o que, na prática, equivaleria a calibrar novamente modelo a cada instante inicial de previsão. Moore et al. (2005) indicam que a necessidade de variação dos parâmetros ao longo do tempo é um diagnóstico da deficiência existente na estrutura do modelo.

2.4.4 Atualização da saída

Também chamado de predição ou correção do erro, esse método consiste em prever os erros de previsão do modelo, o que normalmente é realizado através de modelos ajustados para a série temporal de diferenças (resíduos) entre os valores observados e calculados. Os métodos que pertencem a essa categoria são considerados os mais amplamente utilizados na previsão hidrológica (Refsgaard, 1997; Xiong & O'Connor, 2002; Yu & Chen, 2005) e têm como principal vantagem o fato de serem aplicados de maneira independente do modelo de previsão, o que simplifica significativamente sua operacionalização na previsão em tempo real.

Na atualização da saída de modelos de previsão são utilizados normalmente modelos autorregressivos. Assim a eficiência desse tipo de método depende do grau de persistência do erro entre as vazões observadas e calculadas na série temporal. Exemplos de métodos usados para previsão do erro são: AR (*Auto-Regressive*, e.g. Xiong & O'Connor, 2002; Queiroga & Silva, 2005), ARMA (*Auto-Regressive Moving Average*, e.g. Broersen & Weerts, 2005), ARIMA (*Auto-Regressive Incremental Moving Average* e.g. Berthet et al., 2009), redes neurais artificiais (Abebe & Price, 2003), lógica difusa (e.g. Yu & Chen, 2005) ou filtro de Kalman (Srikanthan et al., 2007).

O procedimento de atualização na saída contempla, de modo geral, três etapas: (a) calibração do modelo chuva-vazão; (b) calibração do modelo de previsão dos erros para a série de resíduos, que pode ocorrer uma única vez ou ser corrigida a cada previsão; e (c) correção dos resultados do modelo no modo simulação, a fim de se obter uma previsão atualizada.

Kahl & Nachtnebel (2008) citam que modelos autorregressivos do tipo AR promovem bons resultados nos primeiros intervalos da previsão e mostram que a autocorrelação dos erros é muito maior em vazões médias e baixas. Isto acontece, tipicamente, porque os erros causados pelo modelo nos períodos de vazões com essa magnitude geram paralelismo nos hidrogramas. Os erros durante os picos, por outro lado, apresentam uma tendência a oscilar de forma rápida e ampla, diminuindo a persistência do erro e assim a aplicabilidade dos métodos de atualização na saída (Serban & Askew, 1991; Moore, 2007; Kahl & Nachtnebel, 2008). Para considerar parte desses problemas, alguns trabalhos têm proposto a utilização da atualização da saída em conjunto com alguns dos métodos de assimilação de dados anteriormente mencionados (e.g. Refsgaard, 1997; Madsen & Stokner, 2005; Kahl & Nachtnebel, 2008).

2.4.5 Considerações finais

Por fim, é importante destacar alguns aspectos gerais na utilização dos métodos de assimilação de dados na previsão de vazões. De acordo com Environment Agency (2002) *apud* Sene (2008), embora a assimilação de dados possa melhorar significativamente o desempenho dos modelos nas previsões de cheia, os resultados dependem, dentre outros, de dois elementos:

- (1) um modelo bem calibrado, capaz de reproduzir uma ampla gama de tipos de eventos;
- (2) da qualidade dos dados de entrada do modelo.

2.5 Verificação das previsões

Conceitualmente, a verificação ou validação é o processo de avaliação da qualidade das previsões definida pelo grau de similaridade entre as observações e previsões (Murphy, 1993; Wilks, 2006). Esse processo permite identificar deficiências, potenciais fontes de erros além de

permitir a comparação entre diferentes metodologias, o que é fundamental no aprimoramento de novas técnicas de previsão (COMET, 2008; Franz & Hogue, 2011; Renner et al., 2009). Este item se destina a descrever algumas medidas de desempenho empregadas na avaliação de previsões determinísticas e probabilísticas.

2.5.1 Previsões determinísticas

2.5.1.1 Medidas de avaliação do erro ou precisão

As medidas de precisão são definidas aqui como aquelas que procuram avaliar a qualidade da previsão com base no erro ou na correspondência média entre os valores previstos e observados. Algumas das medidas de desempenho comumente usadas em hidrologia são: (a) Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe-NS (Nash & Sutcliffe, 1970); (b) Coeficiente de Persistência-CP (Kitanidis & Bras, 1980); (c) Coeficiente de Correlação- r ; (d) Erro médio-EM; (e) Erro médio quadrático-EMQ; e (f) Diagrama de Dispersão-DD. As Equações de (1) a (5), apresentadas abaixo, definem, respectivamente, as medidas de desempenho de (a) a (e).

$$NS_i = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (o_i - p_i)^2}{\sum_{n=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad (1)$$

$$CP_i = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (o_i - p_i)^2}{\sum_{n=1}^N (o_i - o_{i0})^2} \quad (2)$$

$$r_i = \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}} \quad (3)$$

$$EM_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_i - o_i \quad (4)$$

$$EMQ_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (p_i - o_i)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

onde p é o valor previsto; o é o valor observado; \bar{o} é a média dos valores observados; i é a antecedência da previsão; $t0$ é o intervalo de tempo de realização da previsão e N é o número total de previsões.

Nas medidas de desempenho dadas pelas Equações 1 e 2, quanto mais próximo o valor estiver da unidade, melhores são os resultados das previsões. A Equação 1, no entanto, compara o resultado da previsão com o resultado de um modelo hipotético que prevê o valor médio da série histórica para todos os intervalos de tempo até o horizonte da previsão. Diferentemente, a Equação 2 compara o resultado da previsão com o resultado de um modelo hipotético que prevê para todos os intervalos de tempo o último valor observado, para o qual é adotado o termo persistência. Dessa forma quando o coeficiente da Equação 2 apresenta valores menores que zero, a previsão apresenta desempenho inferior a se utilizar como valor previsto o último valor observado.

O Coeficiente de Correlação- r , dado pela Equação 3, mede grau de associação linear entre as variáveis previstas e observadas. Valores iguais a 1 ou -1 representam, respectivamente, associações perfeitas positivas e negativas entre as variáveis avaliadas. Quando r assume valor igual a 0, não existe nenhuma dependência linear entre as variáveis (Naghetini & Pinto, 2007). Um bom complemento para essa medida de desempenho é o Diagrama de Dispersão.

O Erro Médio-EM (Equação 4) mede a diferença média entre um conjunto de previsões e observações correspondentes, podendo ser positivo ou negativo, indicando a direção do erro cometido. Quando é positivo indica uma superestimativa da previsão. Quando assume valores negativos, indica uma subestimativa. O EM não mede a magnitude do erro da previsão, sendo possível obter resultados considerados bons (valores próximos à zero) para uma previsão pela compensação de erros.

O Erro Médio Quadrático-EMQ ou *Root Mean Square Error*, dado pela Equação 5, mede a raiz da diferença quadrática média entre um conjunto de previsões e observações correspondentes. Representa a magnitude do erro cometido na previsão, dando maior peso aos maiores desvios. Quanto mais próximo seu valor estiver de zero, melhores são os resultados das previsões.

O Diagrama de Dispersão-DD não é uma medida de desempenho propriamente dita, mas uma ferramenta utilizada em análises exploratórias (visuais) tanto de previsões determinísticas como por conjunto. Consiste em um gráfico onde são plotados pares das variáveis o e p , que representam, respectivamente, as observações e as previsões, permitindo visualizar o grau de associação entre duas variáveis (Naghetini & Pinto, 2007). O grau de associação linear entre o conjunto de observações e previsões pode ser quantificado pelo Coeficiente de Correlação- r , apresentado anteriormente. A Figura 4, extraída de Naghetini & Pinto (2007), apresenta exemplos de DD com diferentes graus de associação linear.

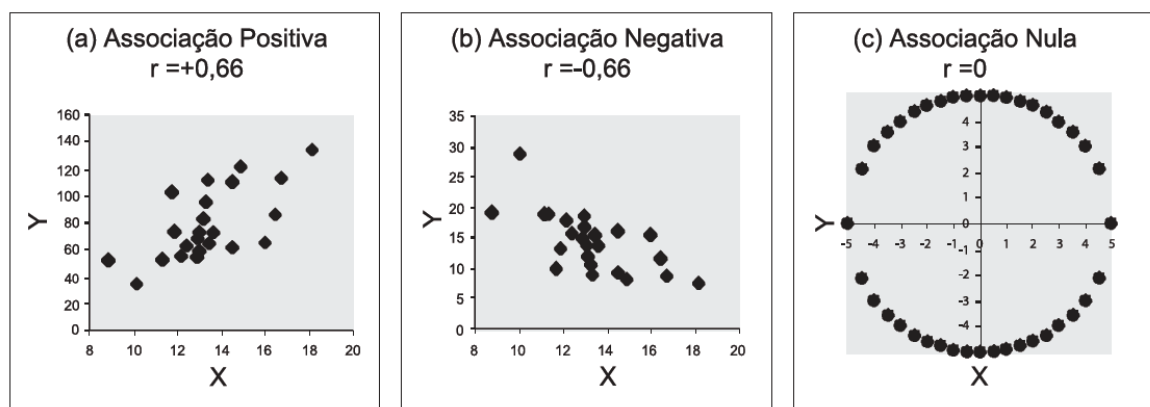


Figura 4. Diagrama de Dispersão mostrando tipos de associação entre duas variáveis X e Y. Fonte: Naghettini & Pinto (2007).

As medidas de desempenho citadas anteriormente, embora sejam voltadas para avaliação de previsões determinísticas, em algumas situações são também usadas na avaliação de previsões por conjunto. Nesse caso, o conjunto de previsões é representado por uma previsão única – o cenário mais provável - normalmente obtida por meio do cálculo de medidas de tendência central do conjunto como a média, moda ou a mediana. Deve-se, no entanto, ter cautela ao se utilizar medidas de desempenho determinísticas para verificação do conjunto, já que o espalhamento do conjunto (intervalo de variação definido pelos membros) pode adicionar destreza à previsão, o que não é possível de ser investigado com uso de medidas determinísticas (Brown et al., 2010).

2.5.1.2 Medidas de desempenho para previsões categorizadas

Muitas vezes, a tomada de decisão pela emissão ou não de um alerta de cheias é desencadeada pela previsão de superação ou não de determinada vazão ou nível de referência. Eventos dessa natureza, onde somente dois resultados, são possíveis são chamados de binários ou dicotomos (Wilks, 2006). Para descrever a distribuição conjunta das previsões e observações em termos de suas frequências é usada a tabela de contingência 2x2, apresentada na Figura 5. As linhas da tabela representam possíveis resultados para as previsões, e as colunas, representam os resultados observados. As diferentes combinações entre os possíveis resultados são resumidas por quatro grandezas: “a” ou acertos (*hits*) representa os eventos observados corretamente previstos; b ou falsos alarmes (*false alarms*) representa o número de eventos não observados que foram incorretamente previstos; “c” (*misses*) é o número de eventos observados mas que não foram previstos; e “d” ou rejeição correta (*correct rejection*), representa o número de eventos não observados e que não foram previstos.

		Observado		
		Sim	Não	Total
Previsto	Sim	a	b	a+b
	Não	c	d	c+d
	Total	a+c	b+d	n=a+b+c+d

Figura 5. Tabela de contingência para um evento dicotômico (Fonte: Wilks, 2006).

Para caracterizar a qualidade das previsões com base em tabela de contingência 2x2, podem ser calculadas medidas de desempenho tais como: Taxa de Acerto (*Hit Rate* – H), a Probabilidade de Detecção (*Probability of Detection*-POD), a Probabilidade de Falsa Detecção (*Probability of False Detection*-POFD ou *False Alarm Rate*), a Razão de Alarme Falso (*False Alarm Ratio* – RAF) e BIAS. As formulações, significados e variações dos valores esperados são apresentados a seguir.

Taxa de Acerto-H (Equação 6): Representa a proporção de eventos previstos corretamente, sem distinção entre acertos da ocorrência ou não-ocorrência do evento (Wilks, 2006; Paz & Collischonn, 2011). Tem seu intervalo de variação de 0 a 1. Valores próximos a 1 indicam melhor desempenho.

$$H = \frac{a+d}{n} \quad (6)$$

Probabilidade de Detecção-POD (Equação 7): Proporção de eventos corretamente previstos, dado que o evento ocorreu. Tem seu intervalo de variação de 0 a 1, onde 0 indica pior desempenho.

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (7)$$

Probabilidade de Falsa Detecção ou Taxa de Alarme Falso-POFD (Equação 8): Representa a proporção de eventos incorretamente previstos dada a não-ocorrência do evento. Assume valores entre 0 e 1. Valores de POFD próximos a zero indicam um melhor desempenho da previsão.

$$POFD = \frac{b}{b+d} \quad (8)$$

Razão de alarme Falso-RAF (Equação 9): Indica a proporção de eventos incorretamente previstos do número total de eventos previstos que ocorreriam. Assume valores de 0 a 1, sendo que valores próximos a zero representam um melhor desempenho.

$$RAF = \frac{b}{a+b} \quad (9)$$

BIAS (Equação 10): Relação entre o número total de eventos previstos e o número total de eventos observados. Quando o BIAS assume valor maior que um, foram previstos um número maior de eventos do que realmente ocorreram. Quando assume valores inferiores a 1, foram previstos um número menor de eventos que o indicado pela observação. Valores próximos a um indicam melhores resultados.

$$Bias = \frac{(a+b)}{(a+c)} \quad (10)$$

A Tabela 1 sumariza as medidas de desempenho de precisão e categóricas apresentadas anteriormente.

Tabela 1. Medidas de precisão usadas na avaliação das previsões determinísticas.

Medida de desempenho	Intervalo de variação	Valor ótimo
Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS)	$-\infty$ a 1	1
Coeficiente de Persistência (CP)	$-\infty$ a 1	1
Coeficiente de Correlação (r)	-1 a 1	1
Erro Médio (EM)	$-\infty$ a ∞	0
Erro Médio Quadrático (RMSE)	0 a $+\infty$	0
Taxa de Acerto - H	0 a 1	1
Probabilidade de Detecção - POD	0 a 1	1
Probabilidade de Falsa Detecção - POFD	0 a 1	0
Razão de Alarme Falso - RAF	0 a 1	0
BIAS	0 a $+\infty$	1

2.5.2 Previsões probabilísticas ou por conjunto

O uso de métodos para verificação de previsões probabilísticas é uma prática mais desenvolvida nas ciências atmosféricas, tendo sido recentemente incorporadas em áreas como hidrologia, impulsionadas pelo progressivo uso de métodos de assimilação de dados e da previsão hidrológica por conjunto (Franz & Hogue, 2011). Nos últimos anos alguns trabalhos têm se dedicado especificamente ao tema da verificação das previsões de vazões por conjunto, propondo sistemáticas de análise (e.g. Laio & Tamea, 2007; Cloke & Pappenberger, 2008; Demargne et al., 2010; Franz & Hogue, 2011; Renner et al., 2009) ou a descrição de ferramentas desenvolvidas para

esse fim, como o *Ensemble Verification System-EVS* (Brown et al. 2010).

A verificação das previsões por conjunto inclui medidas de desempenho relacionadas a diferentes aspectos de qualidade - atributos - da distribuição de probabilidades da previsão, tal como precisão, confiabilidade (ou ainda consistência ou calibração), destreza, discriminação e resolução (Murphy, 1993; Wilks, 2006). Dependendo da aplicação da previsão em particular, alguns atributos podem ser considerados mais importantes que outros. Os atributos confiabilidade e discriminação são tipicamente considerados como principais na verificação de previsões probabilísticas (Brown et al., 2010).

Medidas de desempenho que medem a confiabilidade de um sistema de previsão classificam os pares (observação; previsão) em grupos de acordo com os valores da previsão, caracterizando a distribuição condicional das observações em relação às previsões. Por exemplo, um sistema de previsão é confiável se a variável observada ocorre com frequência “p” quando se prevê que ocorra com probabilidade “p” (Candille & Talagrand, 2005). O atributo discriminação é definido como a capacidade do sistema de previsão em discriminar entre dois eventos distintos ocorridos, ou seja, mede como a distribuição de probabilidades prevista varia de um evento para outro. Se a probabilidade prevista não se altera entre eventos de previsão, as previsões não distinguem um evento ocorrido de um não ocorrido, não possuindo, portanto, discriminação. A precisão está relacionada à correspondência média entre as previsões e os eventos ocorridos, medindo a magnitude do erro cometido (Wilks, 2006).

Para verificação das previsões hidrológicas por conjunto segundo os atributos precisão, confiabilidade e discriminação podem ser adotadas três medidas de desempenho: o Brier Score/Brier Skill Score, o Spread-Bias Diagram e o Diagrama ROC.

2.5.2.1 Brier Score e Brier Skill Score

O Brier Score-BS é uma das medidas de desempenho mais comumente utilizadas na avaliação de previsões probabilísticas (Wilks, 2006). O BS representa o erro médio quadrático das previsões probabilísticas, considerando que o evento ocorra ou não, medindo sua precisão. Tem sua faixa de variação definida de 0 a 1, sendo que valores próximos a zero indicam melhores resultados. A Equação 11 define o BS.

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (pp_i - po_i)^2 \quad (11)$$

onde n é igual ao número de pares previsão-observação; pp é a probabilidade de ocorrência prevista do evento e po é probabilidade de ocorrência observada do evento (0 o evento não ocorreu; 1 o evento ocorreu).

Na Tabela 2 é mostrado um exemplo do cálculo do *BS* para 10 eventos de previsão de vazão por conjunto (11 membros), para um determinado limiar e antecedência do horizonte de previsão. Se a vazão observada no evento supera a vazão limite, a probabilidade de ocorrência observada, dada por po , é igual a um. Caso contrário é igual a zero. No caso da previsão por conjunto, a probabilidade de ocorrência (pp) é calculada diretamente pelo número de membros que superaram a vazão limite dividido pelo número total de membros. O *BS* é o somatório dos valores de $(pp-po)^2$ dividido pelo número total de eventos de previsão.

Tabela 2. Exemplo de cálculo do Brier Score.

Evento de Previsão	po	nº de membros que superaram a vazão limite	pp	$(pp-po)^2$
1	1	5	5/11=0,45	(0,45-1) ² =0,30
2	0	2	2/11=0,18	(0,18-1) ² =0,03
3	0	2	2/11=0,18	(0,18-1) ² =0,03
4	1	6	6/11=0,55	(0,55-1) ² =0,21
5	1	10	10/11=0,91	(0,91-1) ² =0,01
6	0	1	1/11=0,09	(0,09-1) ² =0,01
7	0	7	7/11=0,64	(0,64-1) ² =0,40
8	0	9	9/11=0,82	(0,82-1) ² =0,67
9	0	1	1/11=0,09	(0,09-1) ² =0,01
10	1	8	8/11=0,73	(0,73-1) ² =0,07
$\Sigma(pp-po)^2$				1,7
<i>BS</i>				1,7/10=0,17

De acordo com CAWCR (2012) quanto mais raro é evento de superação do limiar na amostra verificada, mais fácil é a obtenção de valores considerados bons para o índice, levando a uma falsa impressão do desempenho da previsão. Por esse motivo, o Brier Skill Score é preferido ao *BS* nessa situação. O Brier Skill Score (*BSS*), dado pela Equação 12, é uma medida de destreza e mede o desempenho de uma previsão principal em relação a outra tomada como referência (e.g. climatologia, persistência ou uma previsão aleatória). Tem seu intervalo de variação de $-\infty$ a 1. Quando assume valores negativos, a previsão de referência possui desempenho superior a previsão principal em termos de *BS*. No caso dos valores obtidos serem positivos, a previsão principal possui melhor desempenho que a previsão de referência.

$$BSS = \frac{BS_p - BS_{ref}}{BS_{perf} - BS_{ref}} = 1 - \frac{BS_p}{BS_{ref}} \quad (12)$$

onde BS_p é o valor de *BS* para a previsão principal; BS_{ref} é o valor de *BS* para a previsão de referência e BS_{perf} é o valor de *BS* para a previsão perfeita, igual a zero.

2.5.2.2 Spread-Bias Diagram-SBD

Uma condição necessária para que uma previsão probabilística seja estatisticamente consistente é possuir um apropriado grau de espalhamento ou dispersão do conjunto. O SBD é uma medida de confiabilidade e mostra diretamente a proporção de observações $SBD(I)$ inserida em janelas ou intervalos fixos I definidos a partir da distribuição de probabilidades da previsão, tal que $I=[c,d|c,d \in [0,1]]$. Esta medida de desempenho é útil no diagnóstico de erros sistemáticos e na avaliação do espalhamento do conjunto, sendo algumas vezes referenciada como *Cumulative Talagrand Diagram* ou ainda *Cumulative Rank Histogram*. Para cada intervalo I da distribuição, a proporção de observações no intervalo SBD é dada por (Brown et al. 2010):

$$SBD(I) = \frac{\sum_{i=1}^n 1\left\{\hat{F}(x_i^0) \in I\right\}}{n} \quad (13)$$

onde x_i^0 é a observação associada a previsão i ; $\hat{F}(x_i^0)$ é o quantil da distribuição de probabilidades da previsão por conjunto correspondente à observação x_i^0 , na previsão i e $1\{\cdot\}$ é uma função degrau que assume valor 1 quando a condição é satisfeita e zero caso contrário e n é o número de previsões. A previsão por conjunto é considerada confiável no intervalo I da distribuição se a proporção de observações captada é igual a $(d-c)$.

Basicamente, o SBD consiste em um diagrama onde no eixo das abscissas aparecem os intervalos definidos a partir, por exemplo, dos decis da distribuição da previsão, e no eixo das ordenadas, a proporção das observações inseridas em média nesses intervalos para todo período de verificação. A Figura 6 apresenta possíveis resultados do SBD na avaliação do espalhamento do conjunto e seus significados. Um sistema de previsão por conjunto é dito confiável quando capta as observações na mesma proporção da amplitude do intervalo da previsão (Brown et al. 2010, Philpot et al., 2012). Isso significa que a observação tem a mesma chance de ocorrer em qualquer intervalo da distribuição estimada do conjunto. Nessa situação, mostrada pela Figura 6(ii), a linha formada pela união entre os pares no diagrama se coloca perfeitamente sobre a linha de 45° do diagrama ($y=x$) e a distribuição é uniforme.

Se a linha que une os pares no diagrama possui inclinação em relação à horizontal menor que 45%, ocorre um subespalhamento do conjunto (*underspread*), estando a maior parte das observações concentradas nos intervalos extremos da distribuição (Figura 6(v)). Essa situação ocorre quando os membros do conjunto tendem a ser muito semelhantes. Quando a inclinação da linha formada pela união dos pares é maior que 45°, o conjunto possui um superespalhamento (*overspread*), mostrado na Figura 6(iv). Nesse caso a dispersão do conjunto é excessiva, estando a maior parte das observações concentrada nos intervalos intermediários da distribuição da previsão.

O SBD também é utilizado para avaliação da existência de erros sistemáticos nas previsões. Quando existe uma superpopulação das observações em intervalos no extremo inferior da distribuição ou abaixo deste é caracterizada a existência de uma superestimativa da distribuição de probabilidades do conjunto (Figura 6(i)). Na situação oposta, quando há uma superpopulação das observações em intervalos no extremo superior da distribuição ou acima deste, existe uma subestimativa (Figura 6(iii)). Nessas situações frequentemente a observação é um *outlier* da distribuição dos membros do conjunto.

A Figura 7 apresenta um exemplo da aplicação do SBD na avaliação de trinta e cinco previsões de vazão por conjunto (11 membros) hipotéticas, para uma determinada antecedência do horizonte de previsão. No caso em questão, foram adotados intervalos fixos I da distribuição da previsão definidos a partir dos 9 decis, além dos valores mínimo e máximo do conjunto. O primeiro passo na definição do diagrama é determinar, para cada evento de previsão, o intervalo I interdecil no qual a observação se encontra. No caso da “Previsão 1”, mostrada na primeira linha da tabela da Figura 7, a observação se encontra entre o 9º decil e o limite superior do conjunto $[0,9;max]$. A célula que representa esse intervalo na tabela, assume valor igual a 1, sendo que os demais intervalos assumem valores iguais a zero. Esse procedimento é repetido para cada uma das 35 previsões do exemplo. O valor de SBD para cada intervalo I representa o somatório dos valores por coluna, dividido pelo número total de previsões. Quando lançados no diagrama, os valores de SBD são acumulados considerando a proporção de observações abaixo do limite inferior da distribuição do conjunto.

No caso hipotético mostrado no diagrama SBD da Figura 7, as previsões são aproximadamente confiáveis, e o espalhamento do conjunto capta relativamente bem as observações, embora alguns intervalos interdecis capturem uma proporção de observações superiores ou inferiores a 10%. No intervalo definido pelo 2º e 3º decis, por exemplo, são captados 3% das observações. No intervalo entre o 8º e 9º decil o conjunto capta 11% das observações. Para que a previsão fosse perfeitamente confiável a proporção de observações em todos intervalos entre $[0,1]$ deveria ser 10%. O ponto de intersecção da linha que une os pares com o eixo das ordenadas à esquerda, dada pelo par $(0;0,17)$, indica que cerca de 17% das observações ficam abaixo do limite inferior do conjunto, mostrando uma superestimativa do conjunto em termos de frequência em relação às observações. Para que o conjunto fosse tivesse maior confiabilidade, deveriam existir mais membros nessa faixa de dados observados. No exemplo apresentado, 83% das observações são captadas pela distribuição do conjunto.

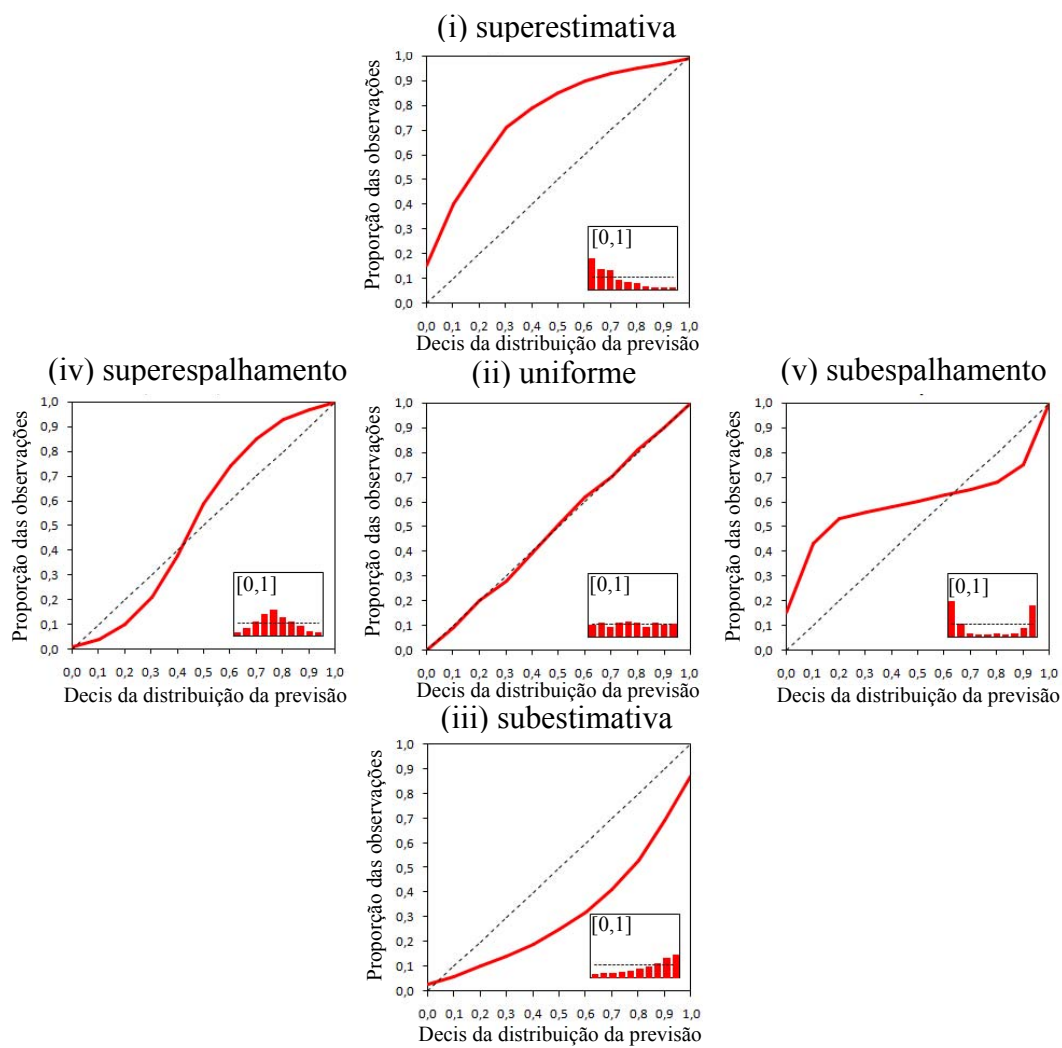
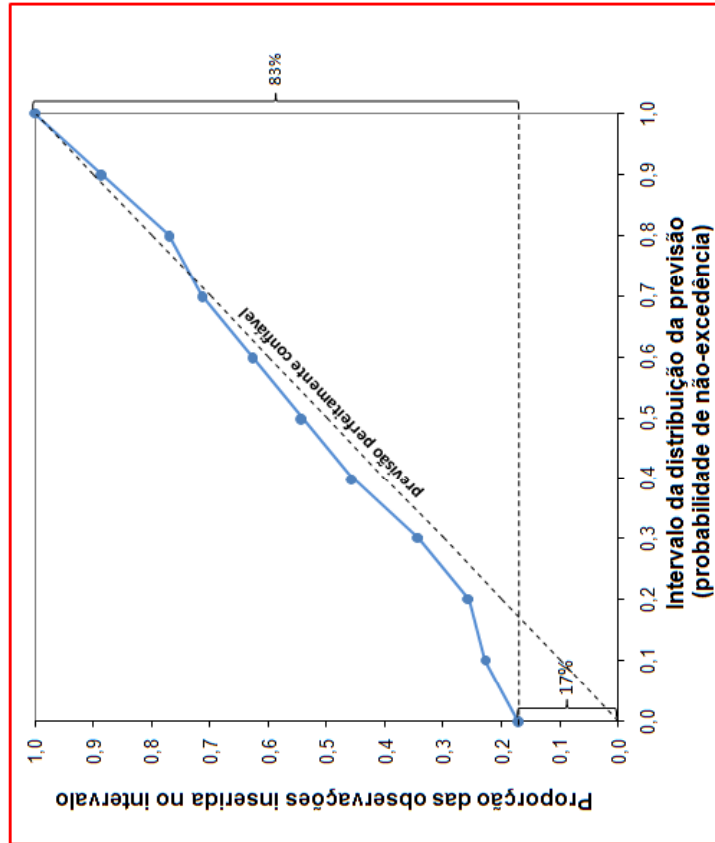
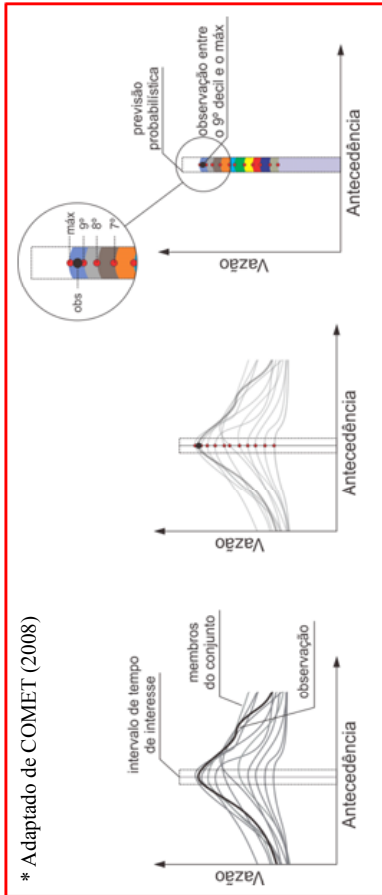


Figura 6. Exemplos de possíveis resultados da aplicação do SBD e seus significados. Adaptado de Wilks (2006).

* Adaptado de COMET (2008)



Intervalos da distribuição de probabilidades da previsão - I

< min	[min;0.1]	[0.1;0.2]	[0.2;0.3]	[0.3;0.4]	[0.4;0.5]	[0.5;0.6]	[0.6;0.7]	[0.7;0.8]	[0.8;0.9]	[0.9;max]	
Previsão 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Previsão 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Previsão 4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Previsão 6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Previsão 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Previsão 9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 11	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Previsão 12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Previsão 14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Previsão 15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Previsão 16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 17	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Previsão 18	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Previsão 19	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Previsão 20	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Previsão 21	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Previsão 22	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Previsão 23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 24	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Previsão 25	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Previsão 26	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Previsão 27	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Previsão 28	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Previsão 29	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Previsão 30	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Previsão 31	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Previsão 32	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Previsão 33	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Previsão 34	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Previsão 35	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Σ	6	2	1	3	4	3	3	3	2	4	4
SBD(i)	0,17	0,06	0,03	0,09	0,11	0,09	0,09	0,09	0,06	0,11	0,11
SBD acum.	0,17	0,23	0,26	0,34	0,46	0,54	0,63	0,71	0,77	0,89	1,00

Figura 7. Exemplo da aplicação do SBD na avaliação de previsões de vazão por conjunto.

2.5.2.3 Diagrama ROC

O Diagrama ROC (*Relative Operating Characteristic* ou ainda *Receiver Operating Characteristic*) mede a habilidade de um sistema de previsão em discriminar entre eventos ocorridos e não ocorridos, como, por exemplo, a ocorrência ou não de inundações (Brown et al., 2010). Pode ser utilizado tanto na avaliação do desempenho de previsões determinísticas como probabilísticas, permitindo ainda sua comparação. No caso de uma previsão determinística, a partir de um determinado limiar definido para a variável é construída uma tabela de contingência 2x2. A partir das informações constantes na tabela são calculados os valores de POD (Probabilidade de Detecção) e de POFD (Probabilidade de Falsa Detecção ou Taxa de Alarme Falso). O par (POD;POFD) é então plotado no diagrama em conjunto com os pares (0,0) e (1,1), sendo unidos por uma linha, conforme metodologia para construção do diagrama (Wilks, 2006).

No caso da previsão probabilística, o diagrama mede a qualidade de uma previsão binária ou da decisão sobre a emissão do alerta baseado em diferentes limites de probabilidade da previsão por conjunto. Dessa forma, para diferentes probabilidades da distribuição da previsão (e.g. decis do conjunto) são construídas tabelas 2x2 e calculados os valores de POD e POFD. Komma et al.(2007) colocam que qualquer um dos quantis do conjunto podem ser usados na decisão de emissão ou não de alertas de cheia, existindo um *trade-off* na escolha do quantil e sua utilidade. Membros do conjunto na extremidade superior, representados por maiores quantis (e.g. 8º e 9º decil), possuem uma maior probabilidade de detectar o evento de cheia (POD), entretanto ocorrerá uma maior taxa de alarmes falsos (POFD). Membros do conjunto na extremidade inferior apresentam menores valores de POD, mas por outro lado, apresentam valores de POFD menores.

A Figura 8 mostra um exemplo hipotético da aplicação do Diagrama ROC. Quando a linha que conecta os pontos no diagrama se coloca sobre a diagonal (45°), a previsão é dita sem destreza, e possui desempenho similar ao da climatologia na previsão. Quanto mais a linha que conecta os pontos se aproxima do canto esquerdo superior (0;1) do diagrama, situação representada pela linha tracejada em vermelho na Figura 8, maior é a proporção de eventos corretamente previstos (POD) e menor é a taxa de alarmes falsos (POFD), o que significa um melhor desempenho da previsão. O Diagrama ROC pode ser considerado uma medida da potencial utilidade da previsão na tomada de decisão sobre a emissão de alertas (CAWCR, 2012).

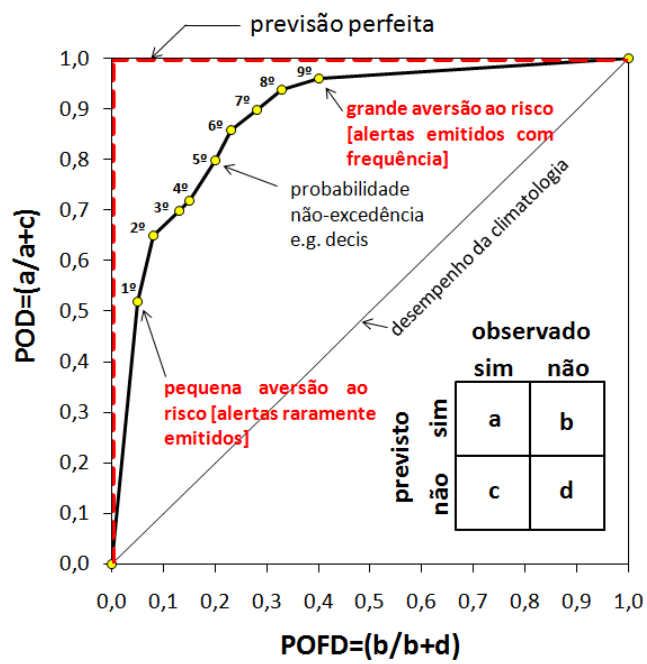


Figura 8. Elementos de um Diagrama ROC para uma previsão probabilística. Adaptado de Brown (2008).

Capítulo 3

Fontes de Dados de Precipitação na Previsão de Cheias

A precipitação é uma das variáveis mais importantes do ciclo hidrológico e o conhecimento de sua ocorrência atual e futura tem papel determinante no planejamento de diversas atividades socioeconômicas relacionadas aos recursos hídricos, tais como: irrigação, navegação, geração de energia hidrelétrica assim como na prevenção de eventos extremos, sejam eles de cheias ou secas.

Uma das ferramentas utilizadas para antecipar as condições futuras da vazão nos rios são os modelos conceituais chuva-vazão, que tem como principal dado de entrada a precipitação observada e/ou prevista na bacia. O desempenho do modelo, no entanto, está intimamente relacionado à qualidade da estimativa de precipitação, tanto em termos do volume total precipitado como de sua distribuição espaço-temporal.

A previsão de cheias em tempo real com modelos chuva-vazão depende, basicamente, de dados de precipitação em dois períodos distintos: (a) estimativas de precipitação até o instante de início da previsão (t_0), e (b) previsão de precipitação. Esses dois tipos de informação influenciam as previsões de vazão de maneira distinta no tempo. Os dados de precipitação em tempo real são importantes na definição das condições iniciais do modelo de previsão, e tendem a impactar as previsões nas antecedências iniciais do horizonte de previsão. A previsão de precipitação tem maior importância em antecedências que ultrapassem o tempo de concentração da bacia, onde podem trazer um benefício importante nas atividades de prevenção de cheias pela ampliação do tempo útil para execução de ações de mitigação dos impactos.

Os dados de precipitação em tempo real, normalmente são obtidos via plataformas de coletas de dados (PCDs) instaladas em campo, dotadas de dispositivos telemétricos que permitem a transmissão remota em tempo real das informações. Entretanto, a cobertura desse tipo de dispositivo para a maior parte das bacias ainda é insuficiente. No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, as dificuldades técnicas e financeiras relacionadas à instalação e manutenção das PCDs, assim como aquelas ligadas à validação e disponibilização em tempo real das informações medidas, têm sido algumas das dificuldades na implementação de sistemas de previsão e alerta de cheias em modo operacional. Essa questão tem despertado o interesse pelo uso

de estimativas de precipitação derivadas de sensores remotos, como radares meteorológicos e satélites, cada vez mais acessíveis ao público em geral. A capacidade de fornecer ininterruptamente estimativas de precipitação em escalas espaciais e temporais cada vez menores, mesmo durante a ocorrência de eventos extremos, são algumas das vantagens desse tipo de informação.

As previsões de precipitação são tipicamente resultantes de simulações de modelos de previsão numérica do tempo (PNT). Os constantes avanços, visando o aumento da resolução espacial dos modelos, a assimilação de novas fontes de dados e o uso da abordagem probabilística tem aumentado a perspectiva de utilização dessa informação em conjunto com modelos chuva-vazão para ampliação do horizonte das previsões hidrológicas. Como um dos principais elementos na previsão de cheias, os aspectos fundamentais da previsão de precipitação, além de técnicas atualmente utilizadas para melhorar seu desempenho, são apresentados no item a seguir.

3.1 Previsão quantitativa de precipitação (QPF)

Quando se deseja fazer previsões de vazões com antecedência maior que o tempo de concentração da bacia, o conhecimento prévio da precipitação nos intervalos de tempo futuros, dado pela Previsão Quantitativa de Precipitação (QPF), é fundamental. A QPF tem sido colocada como um ponto chave na previsão de cheias, especialmente em pequenas e médias bacias (Toth et al., 2000; Bacchi & Ranzi, 2003; Xuan et al., 2009; Hapuarachchi et al., 2011), onde a ampliação da antecedência da previsão pode promover alertas antecipados, permitindo às autoridades a adoção de medidas de mitigação dos impactos em tempo útil.

Por outro lado, se reconhece que a precisão da QPF está ainda aquém da necessária para previsão de cheias (Pedder et al., 2000). Devido à natureza caótica da atmosfera e à complexidade dos processos envolvidos, a QPF é de difícil modelagem e extremamente sensível às condições iniciais, o que a torna uma das variáveis menos precisas resultantes da previsão numérica de tempo-PNT (Du et al., 1997; Habets et al., 2004; Ebert, 2000). Dada a dificuldade na obtenção da QPF, as previsões de vazões em modo operacional na maior parte do século XX foram realizadas com base na suposição de precipitação futura igual a zero (Collier e Krzyztofowicz, 2000).

Conceitualmente, a QPF pode ser definida como a projeção de uma determinada quantidade de precipitação sobre um ponto ou região, durante um dado período de tempo no futuro (Carter et al., 2000). De acordo com a antecedência com que são determinadas, as previsões podem ser classificadas em (Sene, 2010): (a) previsão de curto prazo: até 72 horas; (b) previsão de médio prazo: entre 3 e 10 dias; e (c) previsão de longo prazo: superior a 10 dias. A previsão realizada com antecedência de até 6h costuma ser chamada de *nowcasting* ou previsão de curtíssimo prazo.

3.1.1 Métodos para obtenção da QPF

A QPF pode ser obtida por métodos estocásticos ou determinísticos. Os métodos estocásticos se utilizam de técnicas de análise de séries temporais como modelos autorregressivos (e.g. AR ou ARMA) ou de redes neurais artificiais, para estimativa da precipitação nos intervalos de tempo futuros (Burlando et al., 1993; Toth et al., 2000; Goswami & O'Connor, 2005). A habilidade de predição desses métodos, entretanto, está condicionada à persistência da série de precipitação no tempo. Toth et al. (2000) citam que as observações no passado por si só não são suficientes para fazer predições futuras precisas. Isso torna esses métodos pouco promissores, já que a suposição da existência de autocorrelação na série de precipitação é bastante frágil.

A previsão determinística da QPF pode ser obtida através de duas técnicas (Sene, 2008, 2010): *nowcasting* ou através de modelos de previsão numérica do tempo. O *nowcasting* é uma previsão de curto prazo, com antecedência de até 6h, baseada primariamente em dados de radar. Esse tipo de previsão normalmente assume que a velocidade, tamanho e a direção da tormenta são conhecidas no tempo presente, assim o desenvolvimento futuro pode ser estimado por extrapolação. Resoluções espaciais típicas resultantes do *nowcasting* são 1-5km com intervalos de tempo que variam entre 5-15min. As QPFs obtidas por *nowcasting* costumam ser mais precisas que as previsões de modelos PNT para antecedências de até a 6h (Sene, 2010).

3.1.2 Previsão numérica do tempo (PNT)

A previsão numérica do tempo usa modelos matemáticos baseados em leis da física com o objetivo de prever a evolução dos sistemas meteorológicos. De acordo com Aravéquia & Quadro (2003), a PNT tem sua origem na possibilidade de integração no tempo das equações diferenciais que descrevem a atmosfera, tratada como um fluido contínuo. A partir do conhecimento do estado inicial do escoamento da atmosfera, suas condições futuras são determinadas através da integração numérica dessas equações. Processos físicos como a radiação, microfísica das nuvens, precipitação e trocas entre a atmosfera e superfície são normalmente representados de forma simplificada nos modelos, através parametrizações.

Na aplicação dos modelos PNT as equações que descrevem os processos atmosféricos são resolvidas sobre pontos discretos de uma grade tridimensional, com resolução horizontal que pode remeter a escala global ou a de uma região particular. Os modelos globais visam identificar o comportamento geral da atmosfera sobre regiões continentais ou subcontinentais, em escalas horizontais entre 10 e 100km. Os modelos regionais, também chamados modelos de área limitada ou de meso-escala, tem sua área de atuação restrita a uma região geográfica, podendo representar com maior detalhe a orografia e outros processos meteorológicos em escalas que variam entre 1 e 10km quilômetros (Davolio et al., 2008; Sene, 2008).

Os modelos regionais são obtidos a partir de um método conhecido como *spatial downscaling*, que pode ser realizado de três maneiras, citadas por Prudhomme et al. (2002). O método mais simples e utilizado por hidrólogos consiste em interpolar os resultados do modelo global em uma grade com maior resolução. O segundo método, considerado o mais complexo, é chamado de *statistical downscaling*. Consiste, basicamente, na utilização de relações estatísticas entre as variáveis atmosféricas dadas pelo modelo global e variáveis climáticas locais. O terceiro e último método é chamado de *dynamical downscaling*. Nessa abordagem se utiliza um modelo atmosférico de resolução mais alta, alimentado nas fronteiras pelas condições produzidas pelo modelo global.

Desde a década de 40 ocorreram sucessivas melhorias na PNT em termos de resolução espacial, representações físicas dos processos atmosféricos e providas por novos métodos de assimilação e fontes de dados (Kalnay, 2003; Habelts, 2004; Pappenberger et al. 2011). Lynch (2008) ilustra esse processo através da evolução da destreza na previsão da variável altura geopotencial em 500 hPa para as antecedências de 36 e 72h, produzidas no NCEP (*National Centers for Environmental Prediction/NOAA*), mostrada na Figura 9. A variável altura geopotencial, é o trabalho requerido para elevar uma unidade de massa do nível médio do mar até um dado nível de pressão, no caso 500 hpa. No eixo das abscissas da Figura 9 é apresentada a destreza das previsões em termos do índice S1 (em porcentagem), que representa o erro relativo no gradiente horizontal da altura geopotencial a 500 hpa. Observa-se, tanto para 36 como para 72h, que a destreza das previsões aumentou ao longo dos últimos 50 anos.

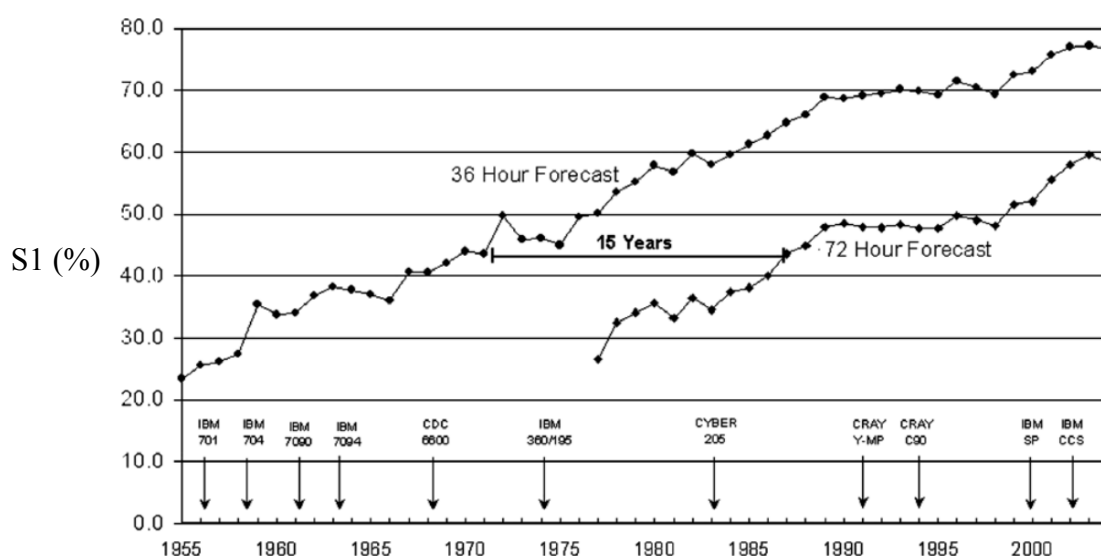


Figura 9. Evolução da destreza das previsões meteorológicas para a altura geopotencial em 500hpa, nas antecedências de 36h e 72h, produzidas pelo NCEP. Fonte: Lynch (2008).

O avanço na PNT, entretanto, não ocorreu da mesma forma para todas as variáveis previstas. Um estudo baseado nas previsões realizadas pelo ECMWF-*European Centre for Medium-Range Weather Forecasting* (Buizza et al., 1999 apud Thielen et al., 2009) mostrou que embora a destreza de previsões de um modo geral (e.g. da variável temperatura) tenham melhorado ao longo do tempo para horizontes entre 5 e 6 dias, a QPF apresentou melhora no desempenho somente entre 2 a 3 dias. No caso de eventos de precipitação extrema, a melhora da QPF se restringe a horizontes ainda menores.

Ainda hoje, a QPF apresenta com erros consideráveis nas escalas de interesse da hidrologia (Davolio et al. 2008), sendo considerada uma das principais fontes de incerteza nos resultados da previsão de vazão/cheias (Krzysztofowicz, 1999; Golding, 2000; Toth, 2000; Collier & Krzysztofowicz, 2000; Ebert et al. 2006; Cloke & Pappenberger, 2009; Xuan et al., 2009; Hapuarachchi et al., 2011; Schellekens et al., 2011). De acordo com Habets et al. (2004) o uso da QPF derivada de modelos PNT em conjunto com modelos hidrológicos para previsão de vazões é limitado por três tipos de erros: (i) localização espacial do evento; (ii) instante de ocorrência dos eventos; e (iii) intensidade da precipitação.

3.1.3 Previsão por conjunto

A abordagem determinística supõe que, pelo menos durante um determinado período de tempo, as equações que descrevem a atmosfera podem ser resolvidas para encontrar campos de previsão, conhecidas as condições atuais dadas pelas observações. O período de tempo sobre o qual as previsões são precisas depende da escala espacial do fenômeno de interesse. No caso da precipitação localizada, acredita-se que a atmosfera é previsível ou determinística por até algumas horas à frente (Pedder et al., 2000). Um dos problemas dessa abordagem é a determinação exata do estado inicial. A atmosfera é um sistema não linear, extremamente dependente das condições iniciais, e os modelos PNT também apresentam esta sensibilidade, de tal forma que, se inicializados com condições iniciais ligeiramente diferentes, em pouco tempo simulam estados da atmosfera completamente diferentes (Lorenz, 1969; Leutbecher & Palmer, 2008). Como o estado inicial da atmosfera nunca é perfeitamente conhecido, dificilmente será possível obter previsões determinísticas precisas de tempo com antecedências relativamente longas, tipicamente úteis para as aplicações em previsão e alerta de cheias.

A previsão por conjunto é uma técnica que procura melhorar e ampliar o horizonte das previsões numéricas de tempo. A partir de perturbações inseridas nas condições iniciais do modelo PNT, são obtidos n cenários distintos e equiprováveis, e através de técnicas estatísticas podem ser determinadas as incertezas ou a probabilidade de ocorrência dos resultados. A Figura 10 ilustra uma previsão por conjunto apresentada por Wilks (2006). A linha em vermelho indica o membro de controle da previsão, que representa a melhor estimativa das condições iniciais obtida a partir da

das observações, correspondendo à abordagem tradicional na previsão determinística. As linhas em azul representam a evolução dos diferentes membros do conjunto, originários de diferentes condições iniciais obtidas por perturbação. Com o passar do tempo, aumenta a divergência entre as previsões. Na elipse que representa a projeção final, as previsões mostram comportamentos visivelmente distintos, entretanto qualquer um dos membros representam trajetórias plausíveis do real estado da atmosfera. A dispersão ou o espalhamento entre os membros permite a estimativa da distribuição de probabilidades, e assim a incerteza da previsão. Num cenário ideal, o conjunto deve possuir um grau de espalhamento nem pequeno o suficiente para não englobar a realidade (subespalhamento), nem grande o suficiente para caracterizar um superespalhamento, o que diminui a confiabilidade da previsão (vide item 2.5.2).

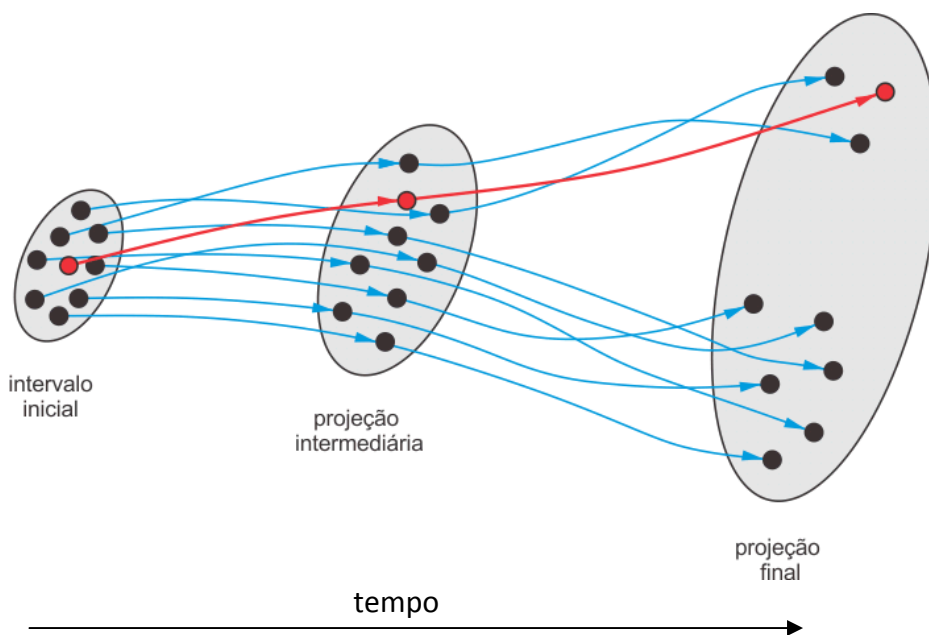


Figura 10. Ilustração esquemática de uma previsão por conjunto. Fonte: Wilks (2006).

A Figura 11 apresenta dois exemplos de previsões por conjunto utilizadas por Kalnay (2003) para configurar previsões boas e ruins. A Figura 11(a), representa uma boa previsão por conjunto. Nessa situação, a evolução verdadeira da atmosfera aparece como um membro plausível do conjunto, ficando próxima da média do conjunto. Tipicamente, a média do conjunto apresenta melhor desempenho que todos ou a maior parte dos membros do conjunto (Raftery et al., 2005).

A Figura 11(b) mostra um exemplo de um conjunto que fornece uma previsão considerada como ruim. Neste caso, os membros apresentam trajetórias bastante diferentes da evolução verdadeira da atmosfera, que fica totalmente fora dos limites definidos pelos membros perturbados do conjunto. Isso indica que outras incertezas que não as relacionadas às condições iniciais, tais

como aquelas relacionadas a deficiências na estrutura do modelo, podem ser dominantes nas previsões.

Pesquisas envolvendo a previsão por conjunto começaram durante a década de 80 no ECMWF e no *National Centers for Environmental Prediction-NCEP*, sendo que somente a partir da década de 90 passaram a ser produzidas experimentalmente em modo operacional (Buizza & Palmer, 1998; Schaake, 2006; Zhang & Pu, 2010). Para geração das previsões meteorológicas por conjunto, diferentes metodologias têm sido utilizadas. A abordagem mais comum e computacionalmente menos dispendiosa consiste em gerar perturbações aleatórias nas condições iniciais do modelo, técnica conhecida como *Breeding* (Zhang & Pu, 2010). Outras metodologias incluem perturbações nos valores dos parâmetros do modelo, conjuntos gerados a partir de uma composição de membros defasados no tempo (*Lagged Average Forecasting*), métodos de assimilação de dados aplicados a diferentes condições iniciais perturbadas e conjuntos constituídos de saídas de modelos com diferentes parametrizações e condições iniciais, técnica citada na literatura como *poor man's ensemble* ou ainda *multi-model ensemble* (Cloke & Pappenberger, 2009; Dietrich et al, 2009). Alguns estudos (e.g. Arribas et al., 2005) têm mostrado que esse tipo de abordagem, mesmo com um número reduzido de membros, pode apresentar desempenho similar ou mesmo superior a metodologias que consideram um único modelo meteorológico para geração do conjunto.

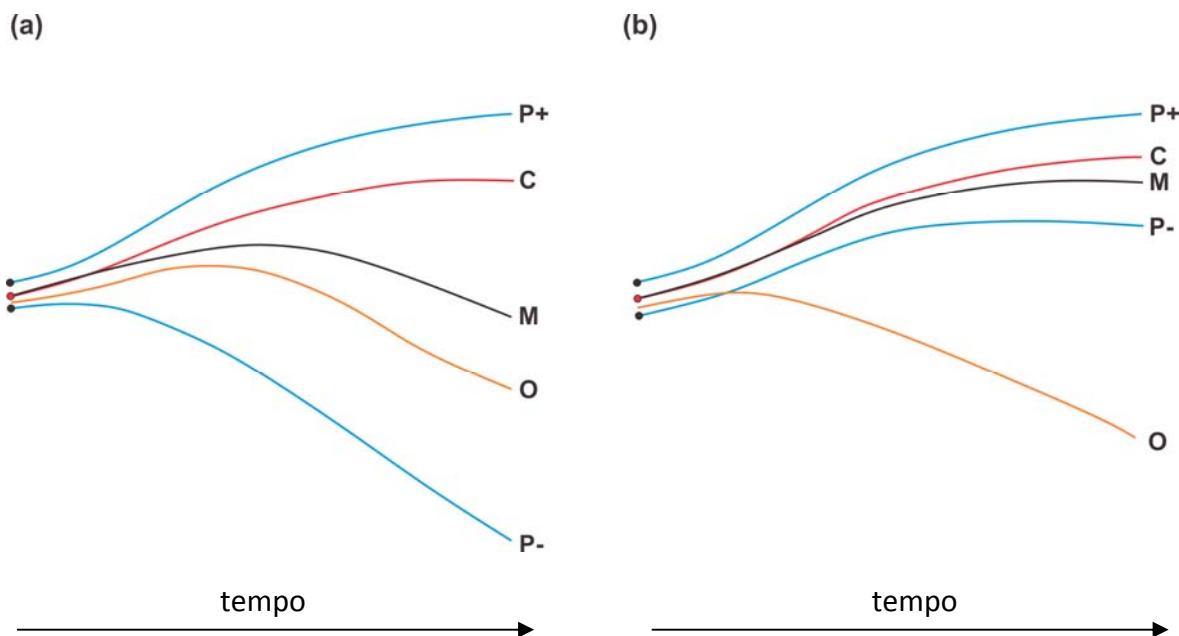


Figura 11. Elementos típicos de uma previsão por conjunto: C é o membro de controle da previsão, que representa a melhor estimativa do estado inicial da atmosfera (linha em vermelho); P⁺ e P⁻ representam previsões perturbadas (linhas em azul); M é a média do conjunto (linha em preto) e O é a evolução verdadeira da atmosfera (linha em laranja). Fonte: Kalnay (2003).

Hoje diversos centros internacionais como o ECMWF, o *Meteorological Center of Canada* (MSC) e o NCEP realizam operacionalmente a previsão meteorológica através de Sistemas de Previsão por Conjunto (*Ensemble Prediction System-EPS*). O ECMWF produz atualmente conjuntos compostos por 51 membros com horizonte de até 10 dias (ECMWF, 2011). De acordo com Richardson (2000), o EPS é um componente importante nas previsões realizadas pelo ECMWF, permitindo complementar a previsão determinística com informações de caráter probabilístico, que refletem a incerteza no estado da atmosfera. No contexto nacional podem-se citar as experiências do CPTEC/INPE e a do Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo-MASTER/IAG-USP, que mantém operacionalmente, em conjunto com outras instituições, um EPS constituído por cerca de 40-50 membros de diferentes modelos PNT, parametrizações e condições iniciais (Silva Dias et al., 2006). O MASTER produz operacionalmente ainda uma previsão determinística baseada no conceito de *multimodel super ensemble* (Krishnamurti et al., 1999), onde os membros são combinados estatisticamente em única previsão, levando em conta seus desempenhos em um passado recente. Nessa composição, são atribuídos maiores pesos a membros com melhor desempenho.

Capítulo 4

Previsão de Cheias por Conjunto

4.1 Contextualização e conceitos

A previsão por conjunto tem sido usada na previsão meteorológica desde a década de 1990 (Dance & Zou, 2010; Nobert et al., 2010; Zappa et al., 2011; Schellekens et al. 2011). Motivado pelo sucesso de sua utilização nesse campo, recentemente os EPSs (*Ensemble Prediction Systems*) passaram a ser incorporados na previsão de vazões, dando origem aos *Hydrological Ensemble Prediction Systems* (H-EPSs) (Demeritt et al., 2007; Cloke & Pappenberger, 2009). Um H-EPS procura fornecer informações sobre a incerteza das previsões hidrológicas, propondo, para cada intervalo de tempo de previsão, um conjunto de soluções a partir do qual se pode estimar a distribuição de probabilidade do preditor (previsão probabilística). Uma previsão determinística, em contraste, apresenta uma estimativa única de vazão para cada intervalo de tempo, não sendo possível estimar a distribuição de probabilidades (Velázquez et al., 2011; Zalachori et al., 2012). De acordo com Krzysztofowicz (2001), previsões probabilísticas são cientificamente mais honestas, permitem a emissão de alertas de cheia considerando seu risco, promovem a tomada de decisões de maneira mais racional e oferecem benefícios econômicos adicionais à previsão determinística. A Figura 12 apresenta uma ilustração da técnica de previsão de vazões por conjunto extraída de COMET (2008).

Historicamente, os primeiros trabalhos envolvendo a previsão de vazões por conjunto, conhecida atualmente como *Ensemble Streamflow Prediction* (ESP), surgiram no início da década de 70, sob o mesmo acrônimo, mas que denotava *Extended Streamflow Prediction*. A metodologia apresentada em Day (1985) foi desenvolvida com objetivo de previsão de volumes e outras variáveis em longo prazo para questões envolvendo o abastecimento de água. Para geração dos diferentes cenários são utilizados modelos hidráulicos e hidrológicos conceituais, com condições iniciais dadas por dados observados de altura de neve, umidade do solo, vazão no rio e condições de reservatórios, alimentados por conjuntos de dados meteorológicos históricos como se fossem previsões futuras. O método assume, assim, que eventos meteorológicos ocorridos no passado são representativos daqueles que podem ocorrer no futuro. Esse tipo de abordagem foi utilizada pela primeira vez na Califórnia, pelo *Nevada River Forecast Center* (RFC), e passou a ser usada de forma mais ampla para previsões de vazões em 1975.

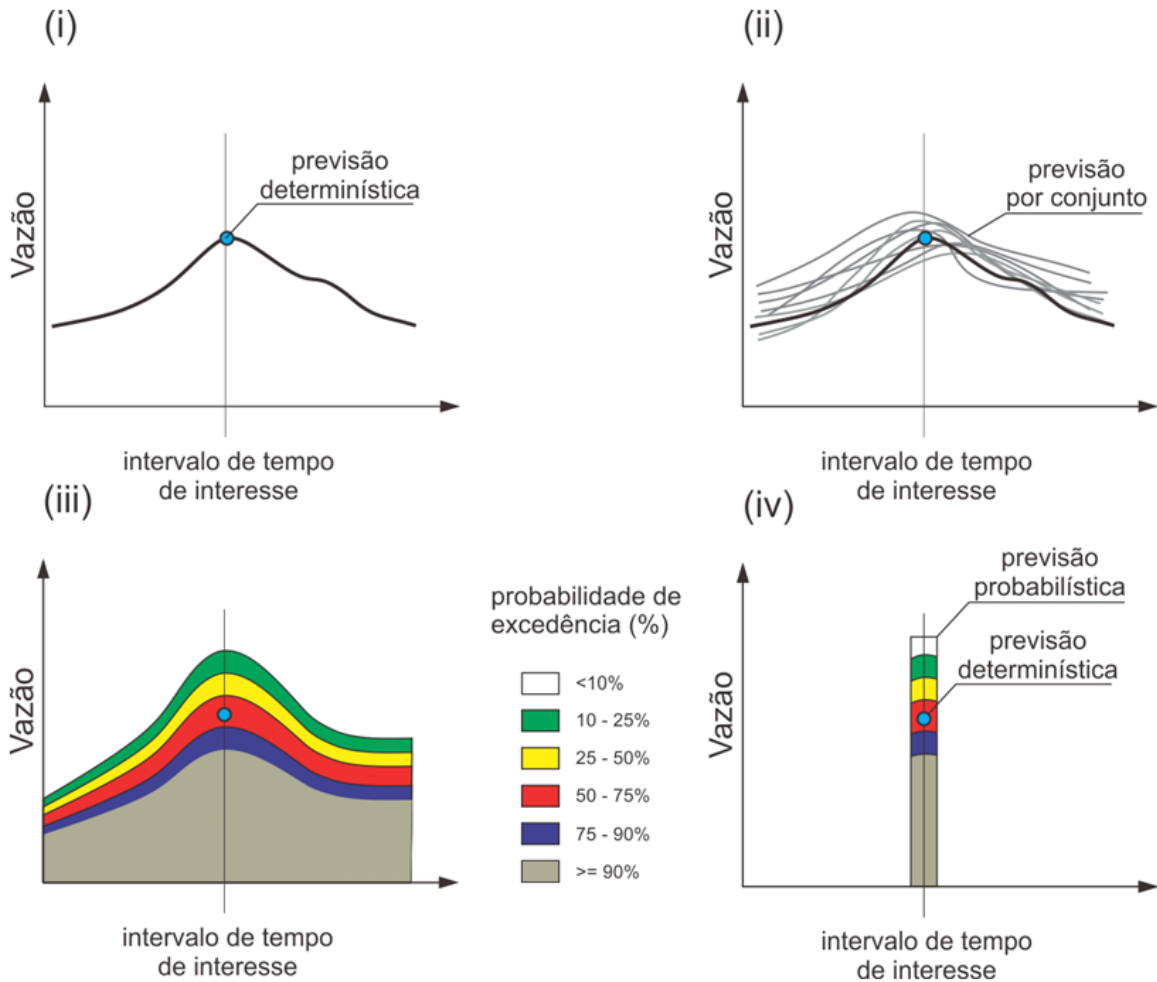


Figura 12. Ilustração da técnica da previsão hidrológica por conjunto. Adaptado de COMET (2008). Disponível em <https://www.meted.ucar.edu/>.

Em sua forma mais simples, a previsão hidrológica por conjunto consiste em alimentar um modelo hidrológico com variáveis meteorológicas previstas por um ou mais EPSs (*Ensemble Prediction Systems*), resultando em possíveis cenários de vazões que refletem as incertezas na previsão meteorológica. Essa abordagem – algumas vezes chamada de “*perfect hydrology*” - parte do pressuposto que as previsões meteorológicas são a maior fonte de incerteza na previsão hidrológica, sendo as incertezas relacionadas ao modelo hidrológico, desprezadas. Variáveis previstas por modelos meteorológicos normalmente utilizadas são a precipitação e temperatura, embora outras variáveis também possam ser utilizadas. Existem ainda abordagens que consideram outras fontes de incertezas importantes na previsão de cheias por conjunto, tais como: a) deficiência na estrutura do modelo hidrológico, onde são utilizados um conjunto de modelos hidrológicos distintos para realização das previsões (e.g. Velázquez et al., 2011); b) a incerteza nos parâmetros do modelo hidrológico (e.g. Pappenberger et al. 2005; Dietrich et al., 2009; He et al. 2012); e c) a incerteza nas condições iniciais do modelo ou nos dados de entrada, como por exemplo na precipitação observada até o instante de início da previsão (e.g. Zappa et al., 2011;

Rossa et al., 2011). A consideração de mais de uma fonte de incerteza nas previsões costuma gerar conjuntos com um grande número de membros, o que pode trazer um benefício em termos de confiabilidade da previsão, mas que no entanto eleva o custo computacional, trazendo dificuldades na operacionalização da técnica (Velázquez et al., 2011, Zappa et al., 2011). Técnicas que propõem a correção de erros sistemáticos ou do espalhamento das previsões meteorológicas por conjunto - pré-processamento - ou das previsões hidrológicas por conjunto - pós-processamento - também tem sido utilizadas, tendo sido reportadas melhorias nos resultados (e.g. Velázquez et al., 2009; Brown & Seo, 2010; Boucher et al., 2011; Zalachori et al., 2012; Andel et al., 2012).

A previsão de cheias por conjunto é uma área de pesquisa bastante ativa, tendo sido publicadas na última década uma série de trabalhos explorando seus potenciais benefícios (e.g. Gouweleeuw et al. 2005; Demeritt et al. 2007; Komma et al. 2007; Verbunt et al. 2007; Jaun et al., 2008; Thirel et al., 2008; Davolio et al., 2008; Zappa et al. 2008, 2011; Pappenberger et al. 2008; Dietrich et al. 2009; Younis et al., 2008; Thielen et al. 2009; Thiemig et al., 2010; Bao et al., 2011; Schellekens et al., 2011; Voisin et al., 2011; Alfieri et al., 2012; Zhao et al. 2012). Muitas dessas pesquisas foram motivadas ou tiveram suporte de iniciativas científicas como o HEPEX - *The Hydrologic Ensemble Prediction Experiment* (Schaake et al., 2006), a quarta fase do MAP (*Mesoscale Alpine Program*) denominada de *D-PHASE-Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood events in the Alpine region* (Zappa et al., 2008; Rotach et al., 2012), RAPHAEEL Project (*Runoff and Atmospheric Processes for Flood Hazard Forecasting and Control*) (Bacchi & Ranzi, 2003) e o COST731 (Rossa et al., 2011).

Aos exemplos de estudos envolvendo a previsão de cheias por conjunto supracitados poderiam ser acrescentados outros, sobretudo na Europa e nos Estados Unidos. Uma revisão bastante abrangente destes estudos foi apresentada por Cloke & Pappenberger (2009). Apesar da maior parte dos trabalhos indicarem benefício pelo uso da abordagem probabilística, até recentemente a abordagem determinística ainda predominava em sistemas de previsão e alerta de cheias (Demeritt et al. 2007; Verbunt et al., 2007). Atualmente, alguns sistemas já utilizam operacionalmente ou em modo experimental a previsão por conjunto, entre eles o *European Flood Alert System-EFAS* (<http://efas-is.jrc.ec.europa.eu/>), o sistema finlandês *The watershed Simulation and Forecasting System* (<http://www2.ymparisto.fi/i2/65/>), o sistema sueco do *Sweedish Hydro-Meteorological Service* (<http://www.smhi.se/>), os sistemas de previsão de cheias do rio Danúbio nas regiões da Bavária (www.hnd.bayern.de) e da Baixa Áustria (<http://www.noel.gv.at/>) e o *NWS Experimental Short-term Hydrologic Ensembles (MMEFS) do National Weather Service* dos Estados Unidos (<http://www.erh.noaa.gov/mmefs/>).

Como prática recente, o uso da previsão de cheias por conjunto ainda enfrenta uma série de desafios, que incluem (Cloke & Pappenberger, 2009, Ramos et al., 2010): a) os EPSs (*Ensemble*

Prediction Systems) usados como entrada na previsão de cheias por conjunto ainda não apresentam desempenho suficiente, necessitando aumento em sua resolução, um maior número de membros e do tratamento de erros sistemáticos e de subespalhamento; b) compreensão e consideração da incerteza total no H-EPS (*Hydrological Ensemble Prediction System*); c) a assimilação de dados hidrológicos em H-EPSs merece mais atenção do que atualmente atrai, especialmente quando é possível mostrar que as condições iniciais do modelo tem um impacto importante na antecipação da previsão; d) não existência atualmente de estudos de caso suficientes para uma análise estatística do real valor das previsões de cheia alimentadas por EPSs, demandando mais estudos de caso; e) Aumento da capacidade de processamento dos computadores: a falta de capacidade computacional continua a ser uma barreira para realização das previsões de cheia por conjunto, o que, segundo os autores, poderia ser superado pelo uso mais eficiente dos recursos computacionais e; f) Comunicação das incertezas: investigar quais são as melhores maneiras de comunicar a incerteza da previsão por conjunto ao usuário final, através do aumento do número de pesquisas focadas no tema.

No item a seguir são apresentadas algumas aplicações da previsão vazões por conjunto selecionadas da literatura.

4.2 Aplicações

O trabalho apresentado por Verbunt et al. (2007) explorou a viabilidade das previsões meteorológicas por conjunto para previsões de vazões, em comparação com previsões meteorológicas determinísticas. Como estudo de caso foi utilizada a porção da bacia do Rio Reno definida pela estação Rheinfelden (34.550km²), na Europa Central.

Como dados de entrada ao modelo hidrológico foi usado um conjunto de previsões das variáveis precipitação, temperatura, velocidade do vento, umidade do ar e insolação, originários do *Limited-Area Ensemble Prediction System* (LEPS). As previsões do LEPS são geradas a partir do modelo de área limitada Lokal Modell (LM), que usa como condições iniciais e de contorno as previsões do EPS (*Ensemble Prediction System*) global do ECMWF (*European Center for Medium Range Weather Forecasting*). Como produto final o LEPS disponibiliza previsões com resolução de 10x10km, frequência de uma hora e horizonte de cinco dias. A previsão determinística no trabalho é representada pelo membro de controle.

O modelo hidrológico usado para realização das previsões é o *Precipitation–Runoff–Evapotranspiration–Hydrotope* (PREVAH), que utiliza a conceito de Unidades de Resposta Hidrológica-URHs. O modelo foi aplicado com resolução espacial de 500x500m e intervalo de tempo horário. A calibração e validação foram realizadas, respectivamente, para os períodos de

1997-1998 e 1999-2002, tendo sido obtidos bons resultados em diferentes condições hidrológicas, incluindo as cheias.

Para as avaliações foram selecionados dois eventos de cheia (mai/99 e nov/02), sendo os resultados avaliados em três afluentes alpinos do rio Reno. Para ajustar as condições iniciais do modelo nas previsões, o modelo hidrológico é alimentado com dados observados durante um período igual a 2 anos antes do início dos eventos considerados.

Os resultados obtidos pelo estudo mencionado mostram que as previsões por conjunto são mais confiáveis quando comparadas a uma única previsão determinística. Para os casos investigados, o conjunto de previsões indica de maneira mais clara a possibilidade de ocorrência de cheias severas, ao contrário das previsões determinísticas, que não detectaram os eventos. Os autores colocam ainda que o sistema de previsão formado pelo LEPS em conjunto com o modelo hidrológico é apto para quantificar as incertezas das previsões, podendo contribuir na tomada de decisão por parte dos usuários.

Pappenberger et al. (2008) avaliaram o uso do *grand ensemble* TIGGE (THORPEX *Interactive Grand Global Ensemble*) na previsão de eventos de cheia ocorridos durante o mês de outubro de 2007, na Romênia. O *grand ensemble* TIGGE engloba sete EPSs (*Ensemble Prediction Systems*), de diferentes centros de previsão meteorológica, que possuem diferentes números de membros (216 membros, no total). Cada EPS, além do TIGGE (que engloba todos os EPSs), foram usados como dado de entrada no *European Flood Alert System* (EFAS). Para previsão de vazões o EFAS usa o modelo LISFLOOD (Van Der Knijff et al., 2010), com resolução espacial de 5km. Esse sistema fornece previsões probabilísticas de cheias para autoridades locais de toda Europa, com 10 dias de antecedência.

Para avaliação dos resultados das previsões foi tomado como referência o resultado da simulação do modelo hidrológico com a chuva observada (*proxi-simulation*), já que não estão disponíveis dados de vazão observados. Os resultados das previsões de cheias foram avaliados sob três pontos de vista diferentes: (a) avaliação das previsões das vazões nos rios, com horizonte de 10 dias; (b) avaliação das características dos hidrogramas previstos no Rio Jiu, afluente do Rio Danúbio, com 5 dias de antecedência; e (c) avaliação das previsões na emissão de alertas de cheia para quatro afluentes do Rio Danúbio, para um horizonte de 10 dias.

Na avaliação das previsões em termos das vazões, item (a), o TIGGE mostrou bom desempenho nas previsões de cheia, para todas as antecedências, fornecendo melhores previsões que qualquer um dos EPSs tomados individualmente. Com relação às análises (b) e (c), a maior parte dos EPSs, incluindo o TIGGE, apresentaram resultados similares. As análises das características dos hidrogramas previstos mostraram que o TIGGE e seis dos sete EPSs previram

bem a ascensão do hidrograma, o tempo de pico e os níveis de alerta. No entanto, nenhum dos EPSs apresentou bom resultado na previsão no trecho final da recessão dos hidrogramas. Nas avaliações das previsões envolvendo emissões de alerta, foram obtidos resultados, novamente, similares nas previsões com os diferentes EPSs.

Na avaliação geral dos resultados, os autores concluem que o TIGGE, por incluir um número maior de cenários de previsão meteorológica, tem menor probabilidade de não detectar um evento, podendo ainda reduzir o número de alertas falsos. Embora a realização de uma avaliação estatisticamente significativa para eventos de cheias seja difícil, os autores colocam que o trabalho fornece indícios que um *grand-ensemble* pode promover melhores resultados que um único EPS nas previsões de eventos de cheia extremos.

Velázquez et al.(2011) compararam o desempenho e a confiabilidade de diferentes tipos de H-EPSs (*Hydrological Ensemble Prediction Systems*) considerando tanto as incertezas nos dados de entrada (previsão meteorológica) como na estrutura do modelo hidrológico. O estudo foi realizado para 29 bacias hidrográficas na França, com áreas entre 1.470km² e 9.390km². Para considerar as incertezas relacionadas à estrutura do modelo hidrológico, foram utilizados 16 modelos concentrados distintos. Como dados de entrada nas previsões foram usados um EPS (*Ensemble Prediction System*) de 50 membros e uma previsão determinística, ambas com horizonte de 9 dias, providas pelo ECMWF (*European Center for Medium Range Weather Forecasting*). As previsões foram realizadas em duas etapas: a) inicialmente os modelos foram calibrados e validados com os dados disponíveis para cada uma das bacias; e b) os modelos foram alimentados com previsões meteorológicas por conjunto e determinísticas do ECMWF, sendo realizadas previsões retrospectivas de vazões durante um período de 507 dias.

Três tipos de cenários foram avaliados no referido estudo: a) Conjunto com 16 membros: todos os 16 modelos hidrológicos alimentados pela previsão determinística; b) conjuntos com 51 membros: cada modelo hidrológico alimentado individualmente pelo EPS com 50 membros, e c) conjunto com 800 membros: todos os 16 modelos alimentados pelo EPS com 50 membros. Os resultados mostraram que as previsões do conjunto produzido por uma combinação de vários modelos hidrológicos com o EPS (800 membros) têm maior destreza e confiabilidade que as previsões obtidas pelo uso individual de cada modelo hidrológico associado ao EPS ou todos os modelos associados à previsão meteorológica determinística (16 membros).

Younis et al. (2008) investigaram o desempenho do *European Flood Alert System* (EFAS) na previsão de um evento de cheia ocorrido durante a primavera de 2006 (março a abril), na porção tcheca da bacia do Rio Elba. A parte tcheca da bacia cobre três quartos da área do país, perfazendo uma área total de 51.413km². Entre seus principais afluentes está o Rio Modalva, que tem seu

regime hidrológico afetado por um sistema de reservatórios em cascata, usados na geração de energia elétrica.

Para as previsões de vazões o EFAS utiliza o modelo hidrológico conceitual LISFLOOD, com resolução espacial de 5km sobre toda a Europa e intervalo de tempo diário. No trabalho ainda foi testada uma versão do modelo com 1km de resolução espacial. Nas previsões de vazões, o modelo é alimentado por três previsões meteorológicas - duas determinísticas e uma por conjunto - providas pelo DWD (*German National Weather Service*) e pelo ECMWF (*European Center for Medium Range Weather Forecasting*). As características das previsões meteorológicas são:

- DWD: Previsão meteorológica determinística, com horizonte de 7 dias, sendo a resolução espacial de 7km nos primeiros três dias e de 40km nos últimos cinco dias;
- ECMWF: Previsão meteorológica determinística com resolução espacial de 10km e horizonte de 10 dias;
- ECMWF-EPS: Previsão meteorológica constituída por um conjunto com 51 membros, horizonte de 10 dias e resolução espacial de 80km.

Para avaliação das previsões, foi usado um evento de cheia ocorrido no período entre março e abril de 2006. Os resultados das previsões foram avaliados de duas formas:

(i) Avaliação na superação dos níveis de alerta, através de um mapa espacial de excedência para a bacia do Rio Modalva, onde cada pixel da rede de drenagem da bacia é colorido de acordo com o nível de alerta superado indicado pelo modelo (vide Figura 14). Complementando os mapas, os resultados são avaliados por meio de Diagramas de Excedência (vide Figura 15).

(ii) Análise dos hidrogramas previstos em duas estações fluviométricas no rio Modalva: Praha-Mala Chuchle e Usti. Nessa análise foi usada a versão alternativa do modelo LISFLOOD com resolução espacial de 1km.

Os resultados das análises com o EFAS mostraram que as previsões meteorológicas por conjunto (ECMWF -EPS) têm maior capacidade na detecção da cheia, fornecendo uma indicação mais forte e com maior antecedência da ocorrência da cheia em relação às previsões meteorológicas determinísticas. No caso dos hidrogramas obtidos, apesar de terem previstos bem a superação da cota limite de inundação para o período de núcleo da inundação (29 março - 8 abril), as previsões de modo geral subestimam os picos dos eventos e promovem uma propagação mais rápida da onda de cheia do que aquela realmente observada. Ao aplicar os dados meteorológicos observados como entrada no modelo de alta resolução, uma melhoria significativa foi observada nas simulações em termos da vazão de pico e do volume dos hidrogramas, mas conservando o erro

de defasagem no tempo. Os autores colocam como possível causa desse erro, a existência de uma cascata de reservatórios existentes no rio Modalva, desconsiderada no modelo de previsão.

Boucher et al. (2011) propuseram uma comparação entre os resultados de previsões de vazão por conjunto e determinísticas num contexto operacional na bacia do rio Gautineau (26.785km²), no Canadá. Durante o outono do ano de 2003 a bacia, que possui uma cascata de reservatórios, sofreu com chuvas intensas que ocasionaram dificuldades na geração de energia além de inundações na municipalidade de Gracefield.

Para guiar as previsões do modelo hidrológico no trabalho, são usadas duas fontes de dados:

- Previsões meteorológicas probabilísticas, oriundas de um EPS operado pelo *Canada Environment*. O sistema emite um conjunto de previsões, com resolução espacial de 200km x200km, produzidas por dois modelos atmosféricos: SEF (global) e GEM (regional), cada um com oito membros meteorológicos.
- Previsões meteorológicas determinísticas, derivadas de um modelo com resolução espacial de 45km x45 km.

O modelo hidrológico utilizado no estudo foi o HYDROTEL, um modelo de base física, usado operacionalmente para previsão de curto prazo pelas autoridades locais e pelas empresas geradoras de energia na bacia. Para diminuir as incertezas nas condições iniciais, o modelo usa um método de atualização das variáveis de entrada (precipitação e temperatura). O modelo foi calibrado no período de março de 2002 a junho de 2003 e validado de setembro de 2003 a dezembro de 2003. As simulações ocorrem em nível diário.

Para realização das previsões a bacia foi discretizada em seis sub-bacias, que possuem dados de vazão observados para avaliação dos resultados das previsões. Como dados de entrada ao modelo são usadas previsões das variáveis temperatura e precipitação. As previsões são realizadas para as antecedências de 48h e 240h para as seis sub-bacias integrantes na bacia do rio Gautineau.

Os resultados mostram que para o horizonte de 10 dias, foco do trabalho, as previsões por conjunto são superiores às previsões determinísticas. Somente em duas das seis sub-bacias analisadas as previsões determinísticas foram ligeiramente melhores, mas só para a antecedência de 2 dias. No trabalho os autores propõem ainda a aplicação de um método de pós-processamento para correção das previsões hidrológicas por conjunto. O uso do método melhorou os resultados para as antecedências iniciais do horizonte de previsão. Em suas conclusões os autores colocam que, para o caso da bacia do rio Gautineau, há benefício no uso das previsões por conjunto sobre previsões determinísticas, mesmo quando a resolução espacial do conjunto meteorológico (200km x200km) é bem menor que a do modelo determinístico (45kmx45km).

Bao et al. (2011), avaliaram o benefício do acoplamento do modelo distribuído Grid-Xinjiang ao *grand ensemble* TIGGE, na previsão de cheias na bacia do Rio Xixian (8.826km²), na cabeceira da bacia do Rio Huaine, na China. A variável precipitação de EPSs de cinco instituições que incluem a base de dados TIGGE foram utilizadas: *Canadian Meteorological Centre-CMC* (15 membros); *European Center for Medium Range Weather Forecasting-ECMWF* (51 membros), *Meteorological Office-UKMO* (24 membros), *US National Centers for Environmental Prediction-NCEP* (15 membros) e *China Meteorological Administration-CMA* (15 membros). Para calibração e verificação do modelo foram utilizados 20 eventos observados entre 1990 e 2008, tendo sido obtidos resultados aceitáveis. Para avaliação das previsões foi selecionado um evento de cheia durante o mês de julho de 2007. As previsões de cheia com o modelo foram realizadas com intervalo de tempo de 6h e horizonte de 10 dias.

Segundo os autores, os resultados obtidos demonstram que: a) o modelo Grid-Xinjiang apresenta bons resultados na simulação e previsão de cheias na bacia Xixian; e b) O *grand ensemble* TIGGE acoplado ao modelo hidrológico é uma ferramenta promissora na emissão de alertas de cheia antecipados com 10 dias de antecedência, promovendo previsões de vazões comparáveis à vazão observada. Os autores colocam ainda que o uso simultâneo de todos os EPSs que compõem o TIGGE nem sempre apresentou melhor desempenho nas previsões de cheia do que o modelo alimentado por um único EPS.

Zhao et al. (2012), apresentaram uma avaliação da previsão de cheias por conjunto na bacia do Rio Huaine (China), em um trabalho semelhante ao de Bao et al. (2011). Para geração das previsões de cheia por conjunto foi utilizado o modelo hidrológico distribuído VIC (*Variable Infiltration Capacity*) alimentado por previsões por conjunto do *grand ensemble* TIGGE e de uma previsão determinística do *German National Weather Service* (DWD). A base de dados do TIGGE utilizada consiste em três EPSs das seguintes instituições: *European Center for Medium Range Weather Forecasting-ECMWF* (51 membros), *US National Centers for Environmental Prediction-NCEP* (21 membros) e do *Canadian Meteorological Centre-CMA* (15 membros). As variáveis meteorológicas previstas utilizadas foram precipitação e temperatura. As previsões de cheia por conjunto foram realizadas com intervalo de tempo diário, horizonte de 12 dias, no período entre 20 julho e 3 agosto de 2008, sendo avaliadas em duas estações de monitoramento (Xixian e Wangjiaba).

Os resultados mostraram que, de modo geral, o desempenho das previsões probabilísticas considerando individualmente cada EPS é superior ao da previsão determinística, especialmente na antecedência de 72h. Observou-se ainda que o espalhamento das previsões por conjunto aumenta com a antecedência, assim um maior número de observações é captada pelo intervalo entre os quantis de 5% e 99% do conjunto. Entre os três EPSs utilizados nas previsões de cheia com o

modelo, o EPS-ECMWF apresentou os melhores resultados, sendo que a previsão com o TIGGE, que utiliza os membros de todos os EPSs, é melhor que qualquer um dos EPSs considerados individualmente. Em suas conclusões, assim como observado em outros trabalhos, os autores colocam a dificuldade em se estabelecer uma avaliação estatisticamente significativa na previsão de eventos de cheia, mas concluem que previsões probabilísticas de um *grand ensemble* fornecem melhores resultados que uma previsão determinística, no caso de eventos extremos de cheia.

Schellekens et al.(2011) avaliaram o desempenho do EPS regional MOGREPS (*Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System*) para uso operacional na previsão de cheias na região do Rio Tâmesa, no Reino Unido. A versão do MOGREPS utilizada possui 24 membros fornecendo previsões para o Reino Unido e Irlanda com resolução de 24 km e horizonte de até 3 dias. Para realização das previsões de cheia, foi utilizado o Modelo TCM (*Thames Catchment Model*), que usa um método de assimilação de dados baseado em um procedimento de atualização na saída (modelo ARMA). As previsões foram realizadas duas vezes ao dia (9h e 21h), com horizonte de 36h, e seus resultados foram analisados em 8 estações.

Os autores colocam que as previsões de precipitação por conjunto do MOGREPS resultaram em boas previsões de cheia em toda a região do Tâmesa, mostrando benefício em relação ao uso da previsão determinística única. A frequência de alarmes falsos no período avaliado foi baixa e eventos menores, abaixo dos limites de alerta, foram também bem previstos.

No Brasil, as pesquisas envolvendo o uso da previsão de vazões por conjunto em curto prazo são ainda incipientes. Com exceção do trabalho de Calvetti (2011), que apresenta uma proposta bastante preliminar na bacia do rio Iguaçu, não foram identificadas na literatura aplicações da técnica. Calvetti (2011) usou previsões meteorológicas por conjunto do modelo WRF, com diferentes composições de processos de microfísica e convecção (10 membros), como condição de contorno no modelo hidrológico Top Model, para previsão hidrometeorológica na bacia do rio Iguaçu até União da Vitória (24.000km²), no Estado do Paraná. As previsões hidrológicas por conjunto foram realizadas com intervalo de tempo horário e horizonte, em geral, de 120h. A avaliação das previsões foi realizada para alguns eventos ocorridos entre os anos de 2005 e 2009, pautada na análise visual e através de medidas de desempenho como os erros no tempo e na magnitude das vazões de pico dos hidrogramas. Na discussão dos resultados, o autor coloca que os erros do conjunto médio foram menores que o da previsão determinística, mostrando vantagem da previsão por conjunto sobre a determinística. O autor observa ainda que o modelo hidrológico é bastante sensível à previsão de precipitação e, portanto, a melhoria das previsões de vazão é proporcional à diminuição dos erros nas previsões de precipitação.

4.3 Comunicação dos resultados das previsões probabilísticas

Uma das principais vantagens atribuídas à previsão de cheias por conjunto é a possibilidade de estimar a incerteza associada à previsão, o que contribui na tomada de decisões e na etapa de comunicação dos resultados, evitando a perda de credibilidade de sistemas de alerta, efeito conhecido na literatura como “*Crying Wolf*”. Uma das questões fundamentais nesse processo é como a previsão probabilística deve ser comunicada, de forma a ser compreendida e utilizada eficientemente por entidades como a defesa civil e usuários em geral. Esse tem sido um dos grandes obstáculos na aplicação dos H-EPSs em modo operacional, já que boa parte dos previsores e usuários estão, tradicionalmente, condicionados ao uso da abordagem determinística (Norbert et al., 2010; Demeritt et al. 2010; Pappenberger et al., 2012). Nesse sentido, há um esforço recente da comunidade científica em investigar formas mais eficientes de comunicar operacionalmente os resultados das previsões probabilísticas (e.g. Demeritt et al., 2007, 2010, 2012; Norbert et al., 2010; Ramos et al. 2010; Pappenberger et al., 2012).

Pappenberger et al. (2012) investigaram diferentes métodos de visualização das previsões de cheia na forma probabilística com o objetivo de melhorar sua comunicação. Para explorar esta questão, foram realizados três exercícios interativos, com 57 especialistas em inundação de 15 países europeus (hidrólogos, meteorologistas profissionais, cientistas ou especialistas em previsão de cheias) em uma oficina de trabalho. Trabalhando individualmente e em pequenos grupos, os participantes da oficina executaram uma série de exercícios, destinados a suscitar seus pontos de vista sobre a comunicação da previsão probabilística de cheias. A partir de um conjunto de gráficos tipicamente utilizados em sistemas de previsão probabilística de cheias em médio prazo, distribuídos pelos organizadores da oficina, os participantes escolheram suas preferências com relação à apresentação dos resultados, sugerindo ainda elementos complementares julgados importantes.

Como resultados final dos exercícios, diversas sugestões de melhorias nos gráficos foram elencadas, e são apresentadas em tabelas organizadas em Pappenberger et al. (2012). A título de exemplificação de possíveis formas de apresentação dos resultados das previsões probabilísticas, foram replicadas na Figura 13 algumas das formas de visualização das previsões de cheia que serviram de base para os exercícios executados na oficina. Os gráficos da Figura 13 apresentam dois tipos de previsões: uma provida por um EPS e outra por uma previsão determinística, obtida com um modelo PNT de alta resolução. Exemplos de apresentação das previsões por conjunto mostradas na Figura 13 incluem diagramas *spaghetti* (Figura 13(a)), gráficos mostrando os intervalos entre quantis e a média do conjunto (Figura 13(b), 13(c) e 13(d)) ou na forma de *box-plots* (Figura 13(e)) em conjunto com outras informações como limites de alerta de cheia, vazões médias mensais ou com vazões com determinada frequência de ocorrência. A Figura 13(f) difere

das demais por não apresentar o hidrograma previsto, e sim a probabilidade de excedência de determinado nível de alerta ao longo do horizonte de previsão.

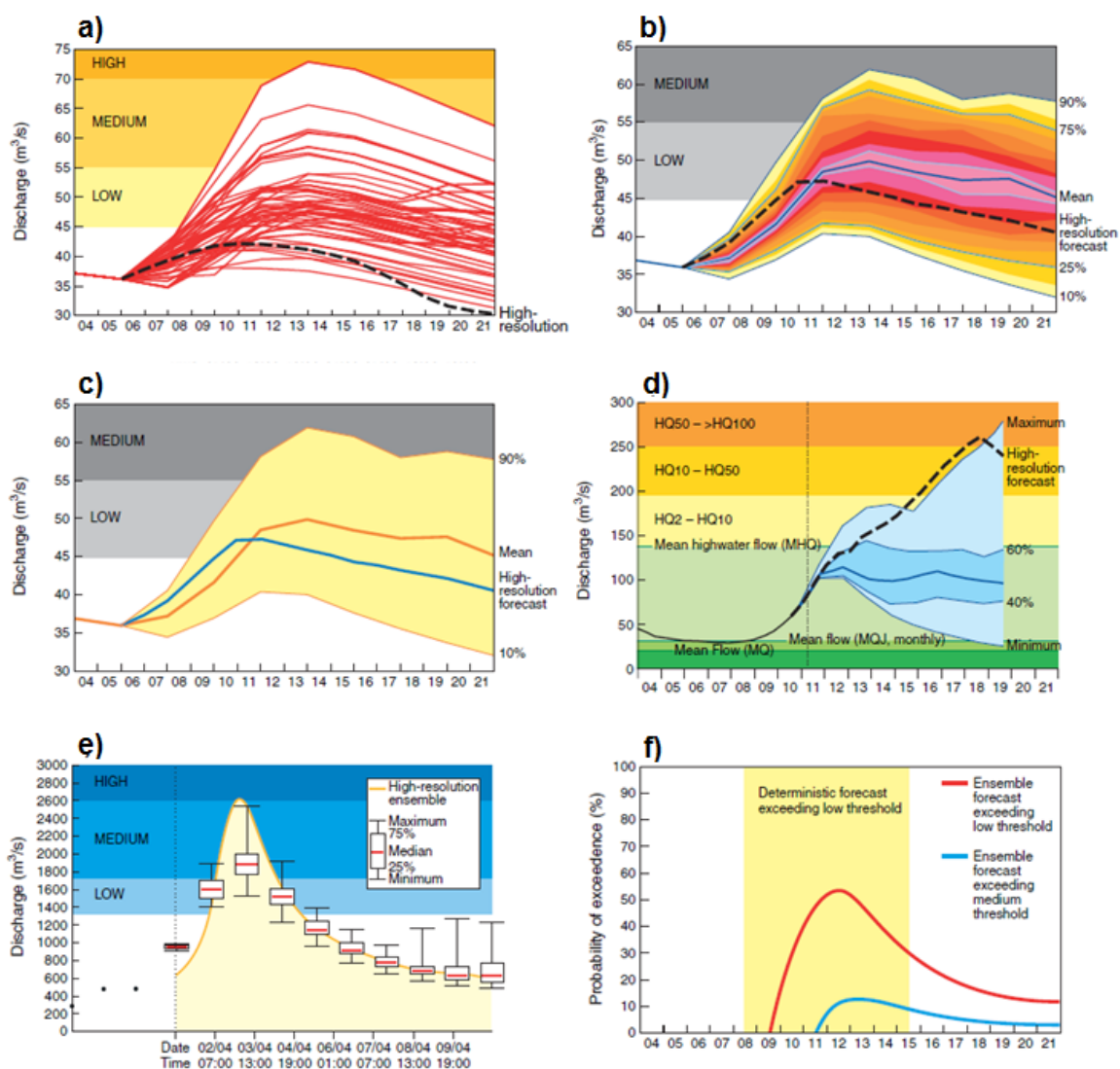


Figura 13. Exemplos de gráficos utilizados para apresentação dos resultados da previsão de cheias por conjunto. Fonte: Pappenberger et al. (2012).

A apresentação de hidrogramas com diversos cenários de previsão nem sempre traz benefício na divulgação dos resultados ou emissão de alertas de cheias, já que são de difícil compreensão por parte dos usuários. No contexto do *European Flood Alert System-EFAS*, por exemplo, Thielen et al. 2009 citam que o resultado das previsões na forma *spaghetti*, onde são apresentados hidrogramas de possíveis cenários de previsão, não se mostrou útil. Para tornar uma previsão de cheias um elemento na tomada de decisão os autores citam que as previsões devem apresentar a probabilidade de excedência de uma determinada condição hidrológica crítica (níveis ou vazões limites).

Formas de divulgação dos resultados de previsões de vazão por conjunto baseadas na probabilidade de excedência de uma determinado limite de alerta são apresentadas em Ramos et al. (2007), Younis et al. (2008) e Thielen et al. (2009). Nesses trabalhos são apresentados dois subprodutos do EFAS, distribuídos para diferentes autoridades da Europa, que auxiliam previsores ou usuários na tomada de decisões em situações em que há necessidade de emissão de alerta de inundações. Os subprodutos são: a) Mapa Espacial de Excedência, que mostra o número de membros que superaram determinado limite de alerta para trechos de rios (Figura 14), e b) Diagrama de Excedência (Figura 15), que mostra resultados de previsões por conjunto, para determinada seção de medição, em termos do número de membros que superaram o limite de alerta, para cada antecedência da previsão.

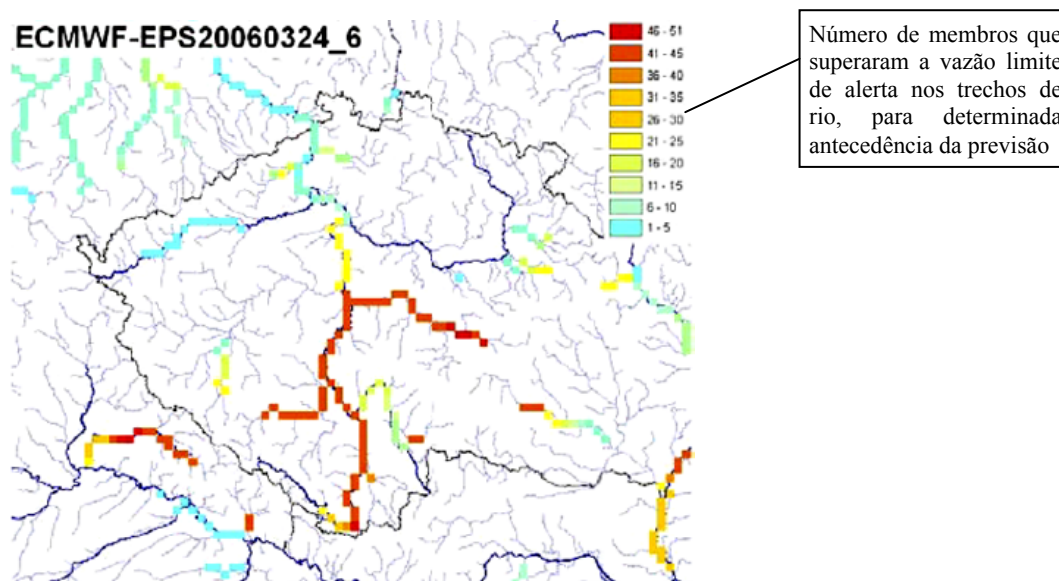


Figura 14. Exemplo de um Mapa Espacial de Excedência, mostrando os limites de alerta superados em trechos de rios para previsões por conjunto. Fonte: Younis et al. (2008).

O uso dos referidos subprodutos foi testado para divulgação de previsões determinísticas e probabilísticas em um seminário organizado com um grupo de previsores operacionais de oito países europeus em Thielen et al. (2005) *apud* Ramos et al. (2007). Três situações de previsão de cheias foram analisadas e os previsores tiveram que decidir se entrariam ou não em contato com as autoridades de proteção civil emitindo um alerta de inundação. Os resultados mostraram que os subprodutos para tomada de decisão baseados nas informações geradas pelas previsões por conjunto contribuíram nesse processo. O Diagrama de Excedência foi considerado útil e de fácil de compreensão, fornecendo a informação considerada essencial na tomada de decisão.

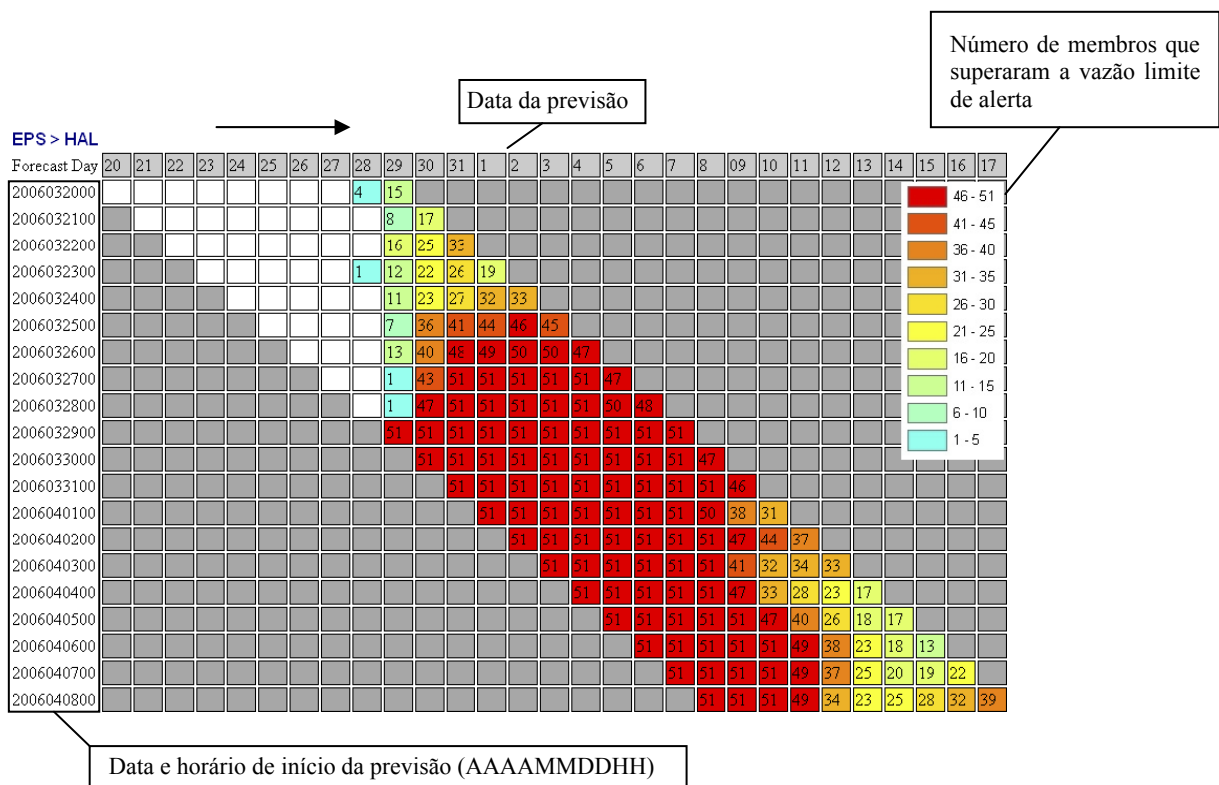


Figura 15. Exemplo de um Diagrama de Excedência para previsões por conjunto avaliadas em uma seção de medição ou ponto de interesse. Fonte: Younis et al. (2008).

4.4 Considerações finais

Nos itens anteriores foram apresentados um breve histórico, conceitos básicos além de algumas experiências recentes da aplicação da previsão de cheias por conjunto. Algumas das principais constatações são:

- Existem evidências que a abordagem da previsão de cheias por conjunto apresenta benefício sobre previsões determinísticas, contribuindo na tomada de decisão para a emissão de alertas de cheias para horizontes de até 10 dias;
- O espalhamento entre os membros conjunto contribui para um aumento da previsibilidade do sistema, especialmente na detecção de eventos extremos. O uso da média do conjunto, por outro lado, representa uma perda de informação na previsão. Mesmo assim, o uso da média do conjunto possui utilidade na previsão de cheias, e, em geral, fornece melhores resultados que todos ou a maior parte dos membros que compõe o conjunto;
- O uso de técnicas que consideram outras fontes de incerteza além das introduzidas pelo conjunto de previsões meteorológicas (e.g. condições iniciais, parâmetros ou nos dados de entrada do modelo hidrológico) ou para correções das previsões (pré-processamento ou pós-processamento) promovem melhorias nos resultados nas previsões de cheias;

- A maior parte dos experimentos relacionados à previsão de cheia por conjunto foi realizada em regiões de clima temperado e continental, em especial na Europa e Estados Unidos, onde a cobertura de monitoramento hidrometeorológico em tempo real é tipicamente maior que em países em desenvolvimento, como o Brasil;
- A abordagem determinística até recentemente predominava sobre a probabilística em sistemas de previsão e alerta de cheias. Esse cenário vem mudando rapidamente nos últimos anos e atualmente já existem sistemas que utilizam a previsão de cheias por conjunto em modo operacional/experimental.

Nessa pesquisa é proposta e avaliada uma metodologia para previsões de cheia por conjunto, aplicada a uma bacia de médio porte localizada em uma região de clima tipicamente tropical, que utiliza previsões meteorológicas por conjunto, dados de monitoramento em tempo real (precipitação e vazão) e ferramentas para previsões de vazões disponíveis em modo operacional no contexto brasileiro. Nesse sentido, os resultados da pesquisa podem trazer uma contribuição importante na operacionalização futura desse tipo de abordagem em bacias com características físicas e climáticas semelhantes.

Capítulo 5

Metodologia

A proposta metodológica está organizada em duas componentes principais, mostradas na Figura 16 e descritas a seguir:

1) Modelagem hidrológica: Abrange atividades pertinentes à aplicação do modelo MGB-IPH à bacia estudo de caso, entre as quais podem-se citar o processamento de informações relativas ao relevo, uso e tipo de solo, discretização da bacia em unidades menores para modelagem, extração de parâmetros físicos e a calibração e validação do modelo hidrológico.

2) Previsão de cheias: Compreende a metodologia utilizada para geração e análise das previsões de cheia e outras atividades correlatas, indicadas pelas letras “a”, “b”, “c” e “d” na Figura 16 e descritas sumariamente abaixo:

(a) Assimilação de dados: Avaliação do benefício potencial do método de assimilação de dados na previsão de cheias além da definição de seus parâmetros;

(b) Previsão de precipitação: Envolve os parâmetros arbitrados no processamento e a sistemática de avaliação do desempenho das previsões de precipitação;

(c) Previsão de cheias por conjunto: Descreve a metodologia usada para geração das previsões de cheia por conjunto e de avaliação dos resultados;

(d) Análise do impacto da redução do número de membros: São avaliados o impacto da redução de 50% e 75% do número de membros do conjunto hidrológico no desempenho das previsões de cheia.

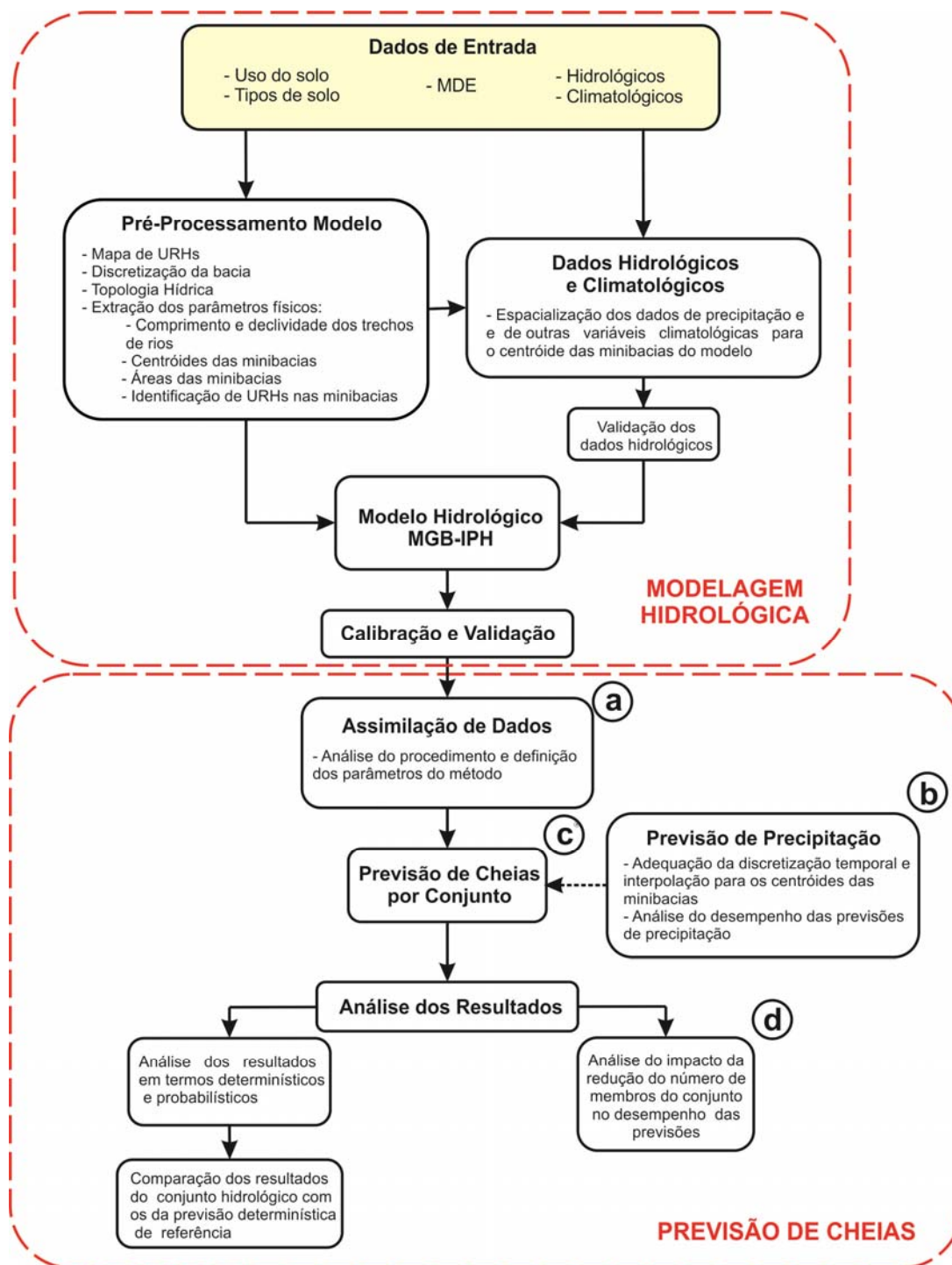


Figura 16. Diagrama de atividades da metodologia.

5.1 Modelagem hidrológica

5.1.1 O modelo MGB-IPH

Para geração das previsões de vazão nesta pesquisa é utilizado o modelo hidrológico MGB-IPH. O MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias) é um modelo hidrológico conceitual, distribuído,

desenvolvido por Collischonn (2001) para aplicações em grandes bacias hidrográficas. A estrutura do modelo foi inspirada nos modelos LARSIM (Bremicker, 1998) e VIC-2L (Liang et al., 1994), com algumas adaptações. Aplicações na previsão de vazões com o modelo podem ser encontradas em Andreolli (2003), Silva (2005), Collischonn et al.(2007) e Paz et al.(2007).

Ao longo dos últimos dez anos, o modelo tem passado por aprimoramentos tanto em sua estrutura como em rotinas de pré-processamento para preparação de seus dados de entrada. A versão atual do modelo utiliza a discretização da bacia em unidades menores, denominadas minibacias. A variabilidade espacial das características relacionadas ao tipo e uso do solo é considerada no modelo utilizando o conceito de Unidade de Resposta Hidrológica – URH (Kouwen et al., 1993). As URHs são áreas de comportamento hidrológico similar, definidas pela combinação de bases de dados como mapas de tipo e uso do solo. Nessa abordagem, cada minibacia do modelo é sub-dividida em classes com unidades de respostas hidrológicas distintas (Figura 17), dentro das quais o modelo hidrológico computa o balanço vertical de água e determina as parcelas de escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo.

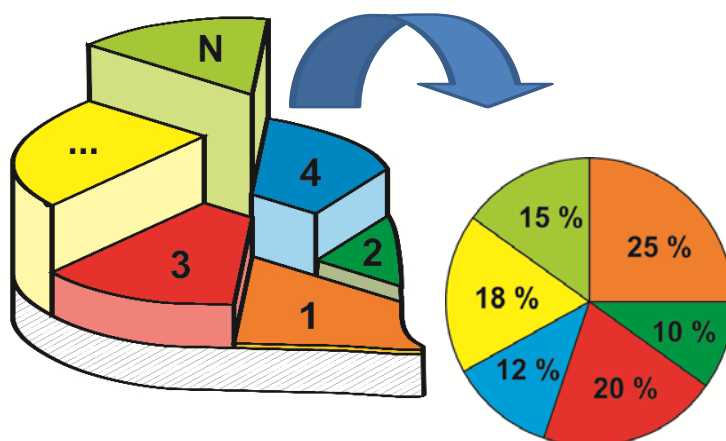


Figura 17. Representação da discretização da minibacia em URHs.

O balanço de água no solo, representado esquematicamente na Figura 18, é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. A evapotranspiração é estimada pelo método de Penman – Monteith (Shuttleworth, 1993).

A propagação dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo em cada minibacia é representada utilizando-se três reservatórios lineares simples. A vazão de saída dos reservatórios é propagada na rede de drenagem com o método Muskingum-Cunge, como descrito por Tucci (1998). Existem ainda variantes do modelo que utilizam outros métodos de propagação do

escoamento na rede de drenagem, como a encontrada em Paiva (2009), que apresentou uma versão do modelo que utiliza um modelo hidrodinâmico unidimensional.

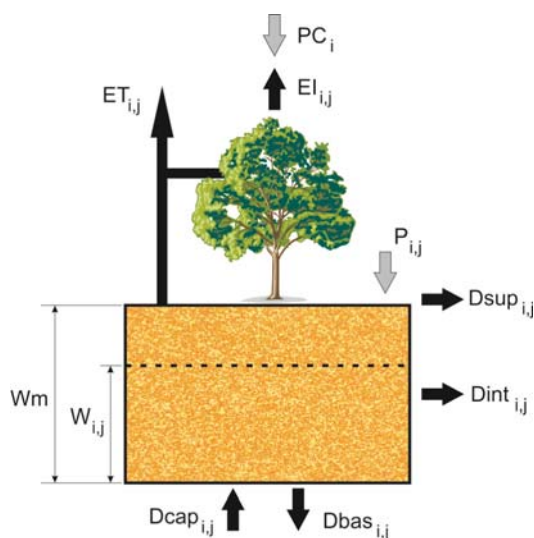


Figura 18. Balanço de água no solo no modelo MGB-IPH. Adaptado de Collischonn (2001).

O intervalo de tempo de cálculo utilizado pelo modelo é diário ou horário, embora alguns processos de cálculo internos, como a propagação de ondas de cheia nos rios, utilizem intervalos de tempo significativamente menores. Apesar de alguns processos serem representados de forma empírica, o modelo hidrológico conta com forte base física, o que fortalece a relação entre os parâmetros e as características físicas da bacia. Uma descrição detalhada do modelo é apresentada no Anexo 1.

5.1.2 Aspectos gerais da aplicação do modelo MGB-IPH

A aplicação do modelo MGB-IPH requer uma série de informações, que incluem bases de dados espaciais como o Modelo Digital de Elevação-MDE, mapas de tipo e uso do solo além de dados hidrológicos – precipitação e vazão - e climatológicos. As bases de dados relacionados ao relevo, uso e tipo de solo determinam os parâmetros físicos do modelo, relacionados às características da bacia tal como área de drenagem, topologia da rede de drenagem, comprimentos e declividades de trechos de rios, localização dos centróides das minibacias, sub-bacias e distribuição das URHs. Esses parâmetros são definidos na etapa de pré-processamento do modelo. Os dados de precipitação e climatológicos são os principais dados de entrada na rotina de cálculo dos processos verticais do modelo, que resultam na geração do escoamento. Os dados de vazão são utilizados na calibração e validação do modelo hidrológico e em aplicações de previsão de vazões. A Figura 19 apresenta um diagrama com as atividades principais na aplicação do modelo.

A etapa de pré-processamento do modelo compreende basicamente duas partes. Em uma primeira parte são determinados, a partir do MDE, planos de informação no formato matricial

contendo informações a respeito das direções de escoamento, área acumulada, rede de drenagem e a discretização da bacia em minibacias e sub-bacias. Em algumas situações a rede de drenagem obtida a partir do MDE pode apresentar inconsistências. Dessa forma, quando possível, é conveniente condicionar o MDE a uma rede de drenagem confiável antes da obtenção dos parâmetros físicos do modelo, na segunda etapa do pré-processamento. Esse procedimento, chamado de *stream burning*, consiste basicamente em uma operação de subtração entre a rede de drenagem matricial e o MDE, rebaixando a elevação das células ao longo dessa rede por um fator arbitrado (Buarque et al. 2009).

A discretização espacial da bacia no modelo possui três níveis: a) minibacias: representam a menor unidade de discretização da bacia, para o qual são extraídos parâmetros físicos como área de drenagem, declividades, comprimentos, entre outros; b) sub-bacias: consistem em um aglomerado de minibacias e definem regiões que utilizam um mesmo conjunto de parâmetros calibráveis do modelo e, c) bacia: representa toda a área simulada.

A discretização em minibacias é efetuada dividindo a bacia nos pontos de confluência entre dois trechos de rios, estações fluviométricas ou outros locais de interesse. A definição da escala de aplicação do modelo, refletida pelo tamanho médio das minibacias, é estabelecida com base em um limite mínimo de área de drenagem, que caracteriza o início da formação de cursos d'água na operação de definição da rede de drenagem. Quanto maior este limite mínimo, menor será a densidade de drenagem e, como consequência, menor será o número de minibacias associadas aos trechos de drenagem gerados.

As URHs são definidas, em geral, pela superposição de mapas de tipo e uso do solo, embora outras informações (e.g. litologia) possam ser utilizadas. A definição do número de URHs depende das quantidades de classes de tipos e usos de solo na bacia. Uma prática recomendada é a redução do número de classes, de modo a se obter um número parcimonioso de combinações entre usos e tipos de solo. Essa definição é subjetiva e deve levar em consideração a escala e o objetivo da aplicação.

Na segunda etapa do pré-processamento, é realizada a extração dos parâmetros relacionados às características físicas da bacia em nível de minibacia, através da rotina computacional PrePro-MGB, desenvolvida por Buarque et al. (2011). Nessa operação, a rotina analisa o MDE e outros planos definidos na primeira etapa do pré-processamento, resumindo as informações relacionadas às características fisiográficas em nível de minibacia.

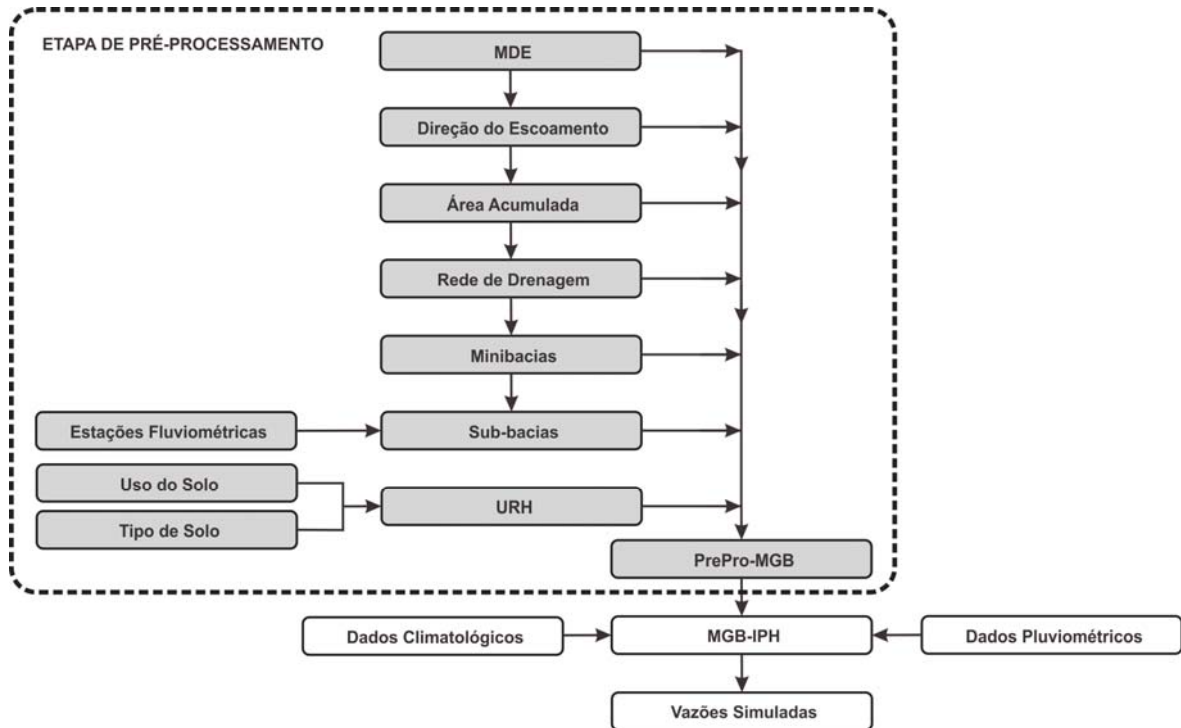


Figura 19. Dados e operações desenvolvidas na aplicação do modelo MGB-IPH. As caixas em cinza representam a etapa de pré-processamento.

5.1.3 Dados hidrológicos e climatológicos

As séries temporais de variáveis como precipitação, temperatura, velocidade do vento dentre outras são normalmente disponibilizadas pontualmente em estações de medição ou na forma de grades ou planos matriciais. Na aplicação do modelo, no entanto, essas informações são necessárias em nível de minibacia, sendo necessário o uso de um método para espacialização dessas informações do local observado para o centróide das minibacias.

No caso da precipitação, esse procedimento é realizado com o uso da rotina INTERPLU (Collischonn, 2001). Nessa rotina, inicialmente, para cada intervalo de tempo de simulação e centróide de minibacia, identifica-se o posto pluviométrico mais próximo com dados disponíveis. Na sequência são selecionados para interpolação os dados de todos os postos situados dentro de um raio de comprimento igual a duas vezes a distância ao posto mais próximo. Para interpolação dos dados é usado o método do Inverso do Quadrado da Distância (IDW- *Inverse Distance Weighted*), dado pela Equação 14 e ilustrado na Figura 20. Nesse método a variável interpolada é ponderada de maneira que a influência dos valores vizinhos decresce com a distância do local em que se deseja determinar seu valor.

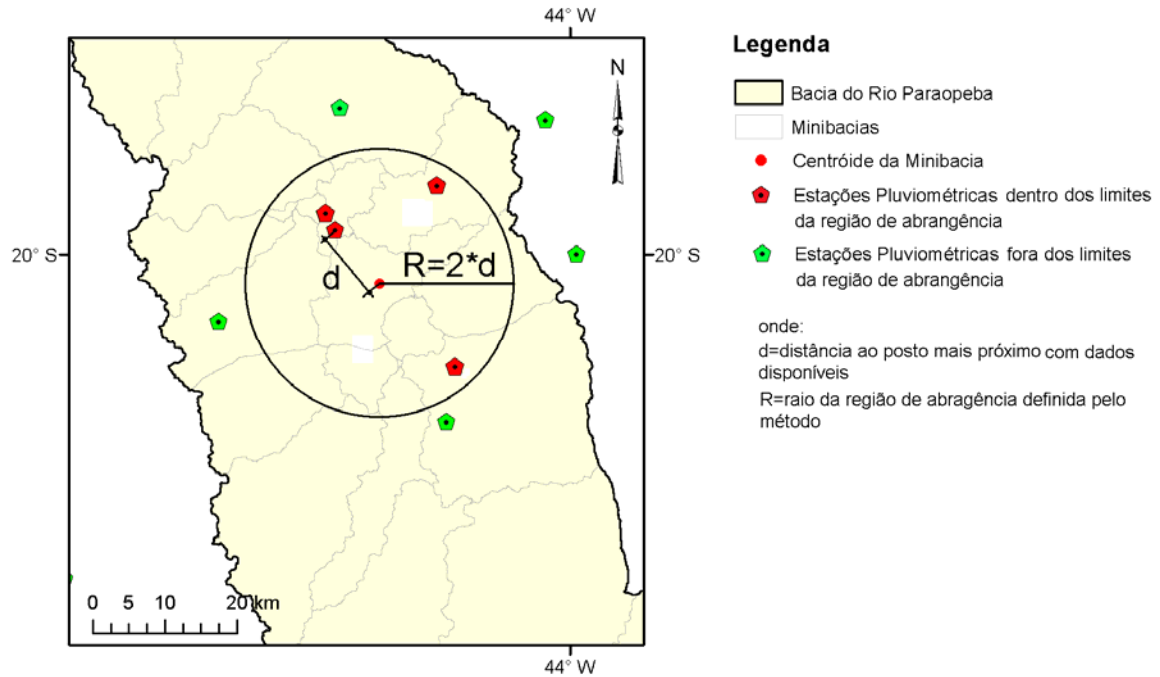


Figura 20. Ilustração do método do inverso do quadrado da distância utilizado na interpolação de dados de precipitação.

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^{np} \left(\frac{P_i}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^{np} \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (14)$$

onde P_c é a precipitação interpolada para o centróide da minibacia; d é a distância euclidiana do posto pluviométrico ao centróide da minibacia; P é a precipitação observada nos postos pluviométricos e np o número de postos considerados.

No caso dos dados climatológicos - temperatura do ar, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica - as séries de dados espacializadas são obtidas através do método de interpolação do vizinho mais próximo, no qual o valor estimado para o centróide da minibacia é definido como aquele observado no posto mais próximo do local. Os dados de vazão são utilizados na calibração e validação do modelo hidrológico e pelo método de assimilação de dados em aplicações de previsão de vazões.

5.1.4 Validação dos dados hidrológicos

Dois tipos de informações hidrológicas foram utilizados nessa pesquisa: (a) dados horários de precipitação e vazão, provenientes de uma rede telemétrica com registradores automáticos; e (b)

dados diários de precipitação e vazão, de estações convencionais da ANA, utilizados como informação de apoio na verificação dos dados horários.

A validação das informações hidrológicas foi realizada em duas etapas. Em uma primeira etapa, as séries de dados horários de precipitação e vazão obtidas via rede telemétrica foram submetidas a uma avaliação visual, procurando identificar erros grosseiros derivados de possíveis problemas nos sensores de medição. Tipos de erros passíveis de investigação em séries de vazão de registradores automáticos são, por exemplo, oscilações bruscas em intervalos de tempo consecutivos, assumindo, a seguir, valores próximos aos anteriores à oscilação ou ainda patamares constantes durante a ascensão ou recessão do hidrogramas. No caso das séries de precipitação, buscam-se valores considerados excessivos, usando-se como parâmetro dados de outras estações na região. Os procedimentos considerados na validação não fazem qualquer tipo de correção ou substituição de valores das séries, sendo descartados os valores considerados inconsistentes.

Em um segundo momento as séries horárias via telemetria foram comparadas com séries diárias disponíveis na base de dados da ANA, no período onde há simultaneidade de informações. Para que fosse possível a comparação das séries que possuem diferentes discretizações temporais, foram geradas séries diárias a partir dos dados horários, reproduzindo a sistemática usada no monitoramento das variáveis em estações convencionais da ANA. No caso das vazões horárias, as séries diárias representam a média entre as vazões registradas às 7 e 17h. Para cálculo da precipitação diária, a série horária é acumulada entre às 8h e 7h do dia seguinte.

Na avaliação dos dados pluviométricos das estações em terra as análises não são realizadas individualmente por estação, e sim integradas sobre a bacia. Para geração dessa informação, os dados de precipitação diários são primeiramente interpolados para os centróides das minibacias do modelo hidrológico. A precipitação média sobre a bacia representa, assim, o somatório dos valores de precipitação em cada minibacia ponderado por sua respectiva área de drenagem. As duas séries diárias integradas na bacia, obtidas das redes telemétrica e convencional, são comparadas em nível diário e mensal. A avaliação da série de vazões horárias é realizada pela comparação dos valores das séries de vazões diárias obtidas via rede telemétrica e convencional.

5.1.5 Calibração e validação do modelo hidrológico

O modelo MGB-IPH possui, de modo geral, três classes de parâmetros, definidos em diferentes etapas de sua aplicação:

- (a) Parâmetros Físicos: são aqueles relacionados às características físicas da bacia, determinados na etapa de pré-processamento do modelo hidrológico, apresentados anteriormente;

- (b) Parâmetros Fixos: os parâmetros fixos do modelo estão relacionados à vegetação e são utilizados no cálculo de alguns dos processos hidrológicos verticais do modelo como o balanço de água no solo e a interceptação. Os parâmetros são: albedo, índice de área foliar, resistência superficial e altura do dossel. Normalmente, os parâmetros incluídos nessa classe não são alterados no processo de calibração. Estes parâmetros são estimados com auxílio de dados contidos na literatura bem como em aplicações anteriores do modelo. Alguns parâmetros, como o coeficiente de rugosidade de Manning, usado pelo método de propagação na rede de drenagem, também são considerados fixos. A descrição dos parâmetros fixos do modelo é apresentada na Tabela 13, no Anexo 1.
- (c) Parâmetros Sensíveis ou Calibráveis: os parâmetros calibráveis do modelo estão associados às propriedades físicas das URHs e são aqueles que efetivamente são submetidos ao processo de calibração. Os parâmetros são: capacidade de armazenamento do solo (W_m), forma da relação entre armazenamento e saturação (b), vazão durante a estiagem (K_{bas}), quantidade de água que escoia subsuperficialmente (K_{int}), forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL), fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP), armazenamento residual (W_c), calibração da propagação superficial (CI), calibração da propagação subsuperficial (CS) e retardo do reservatório subterrâneo (CB). A Tabela 14, localizada no Anexo 1, apresenta o significado de cada um dos parâmetros.

Na execução dos procedimentos de calibração e validação do modelo a série de dados de vazão é particionada em duas amostras, onde o período com maior disponibilidade de dados, tanto pluviométricos como fluviométricos, é preferencialmente utilizado na calibração do modelo. A calibração do modelo é realizada em duas fases. Na primeira fase é realizado o ajuste manual dos parâmetros, buscando aproximar os hidrogramas calculados dos observados. Em uma segunda fase, os parâmetros previamente determinados são submetidos ao procedimento de calibração automática utilizando o algoritmo de otimização MOCOM-UA (Yapo et al, 1998).

Na validação do modelo, os parâmetros calibrados são usados para simulação de um período não pertencente à amostra usada na calibração do modelo. As medidas de desempenho consideradas tanto na calibração como na validação do modelo são: (a) o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS); (b) o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões (NS log); e (c) o erro de volume dos hidrogramas (ΔV). As Equações 15, 16 e 17 apresentam essas medidas de desempenho. A Figura 21 apresenta um diagrama esquemático da calibração e validação do modelo.

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{o_i} - Q_{c_i})^2}{\sum (Q_{o_i} - \overline{Q_o})^2} \quad (15)$$

$$NS \log = 1 - \frac{\sum (\log Q_{o_i} - \log Q_{c_i})^2}{\sum (\log Q_{o_i} - \overline{\log Q_o})^2} \quad (16)$$

$$\Delta V = \frac{\sum Q_{o_i} - \sum Q_{c_i}}{\sum Q_{o_i}} \quad (17)$$

onde Q_o são as vazões observadas no intervalo de tempo i ; Q_c são as vazões calculadas no intervalo de tempo i e $\overline{Q_o}$ é a média dos valores observados.

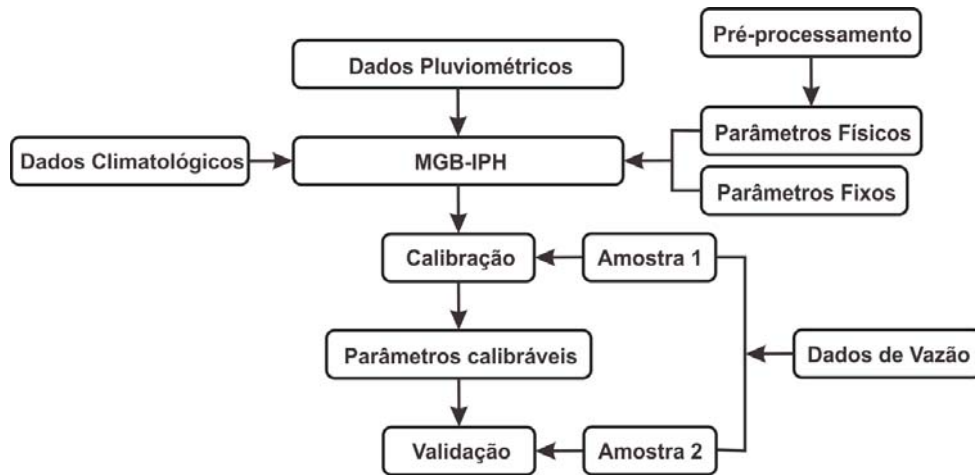


Figura 21. Diagrama esquemático da calibração e validação do modelo hidrológico.

5.2 Previsão de cheias

5.2.1 Previsão de vazões com o modelo MGB-IPH

A metodologia para previsão de vazões com o modelo MGB-IPH utiliza a mesma arquitetura e rotinas computacionais para cálculo dos processos hidrológicos verticais e horizontais do modelo em modo simulação. O modo previsão se distingue pela inclusão de duas rotinas adicionais: uma de controle, que estabelece parâmetros da previsão como o horizonte, a frequência e o período ao longo do qual se estendem as previsões sequenciais (em batelada); e b) uma rotina de assimilação de dados de vazão, que atualiza algumas das variáveis de estado do modelo com base nos últimos valores de vazão observados até o intervalo de tempo de realização da previsão.

A Figura 22 apresenta um fluxograma simplificado mostrando como é executada a previsão sequencial (em batelada) com o modelo MGB-IPH. O procedimento começa com a determinação das condições hidrológicas na bacia em modo off-line, onde são estimados os valores de algumas das variáveis de estado do modelo com base nos dados de precipitação e nos dados climatológicos observados. Na sequência é realizada a atualização das variáveis de estado, com base nos últimos valores de vazão observados. Esse procedimento é realizado continuamente, para cada intervalo de tempo ao longo do período de previsões, independente da realização ou não da previsão no intervalo. A descrição do método de assimilação de dados é apresentada no item 5.2.1.1, a seguir.

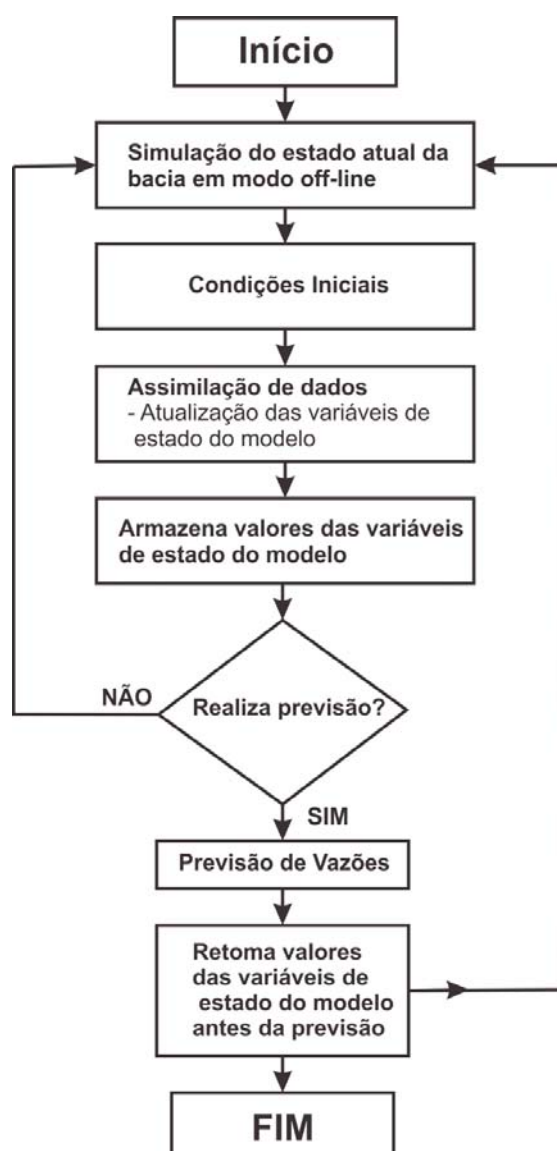


Figura 22. Fluxograma simplificado da rotina de previsão de vazões do modelo MGB-IPH.

A decisão de realização ou não da previsão de vazão propriamente dita é determinada pela rotina de controle do modelo. Estando disponíveis dados de previsão de precipitação, inicia-se um

ciclo de previsão com o horizonte pré-estabelecido. Caso contrário, o modelo prossegue para um novo intervalo de tempo e reinicia-se o processo. O horizonte e a frequência das previsões são, normalmente, definidos pelas características das previsões meteorológicas.

5.2.1.1 Assimilação de dados

A assimilação de dados no modelo hidrológico é realizada através de um método empírico, proposto originalmente por Andreolli (2003), sendo sua última versão apresentada nos trabalhos de Paz et al. (2007) e Collischonn et al. (2007). O método utiliza as vazões observadas em tempo real para atualizar condições iniciais do modelo, expressas por algumas de suas variáveis de estado. As variáveis de estado consideradas são as vazões calculadas ao longo da rede de drenagem e o volume de água armazenado nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo de cada minibacia do modelo hidrológico.

A atualização das variáveis de estado do modelo se dá através de um fator de correção (*FCA*), definido como o quociente entre o somatório das vazões observadas e calculadas durante um período anterior à previsão, conforme apresentado na Equação 18.

$$FCA_s = \frac{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q'_{obs}}{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q'_{calc}} \quad (18)$$

onde Q'_{obs} e Q'_{calc} são as vazões observadas e calculadas, respectivamente; t é o tempo de cálculo; t_0 é o intervalo de tempo da realização da previsão; t_a é o intervalo de tempo durante o qual é feita a comparação entre valores calculados e observados e s representa a minibacia exutório da sub-bacia, onde existe um posto fluviométrico com dados observados para atualização do modelo.

No método, a cada intervalo de tempo de simulação, o fator de correção é calculado e aplicado às variáveis de estado do modelo para cada uma das minibacias pertencentes à sub-bacia definida por s . No caso da atualização das vazões na rede de drenagem, o fator *FCA* é ponderado pelo quociente entre a área de drenagem acumulada de cada minibacia e a área acumulada na minibacia de exutório da sub-bacia (s). Assim, as correções da vazão no método são mais fortes em minibacias localizadas sobre a drenagem principal, que possuem maiores áreas de drenagem acumuladas. Na minibacia onde existem dados fluviométricos as vazões observadas são usadas em lugar das calculadas pelo modelo. Para as demais minibacias, as vazões calculadas pelo modelo são atualizadas de acordo com a Equação 19. Esse método admite que as vazões observadas são confiáveis ou livres de erros.

$$Q_{at_{k,s}} = FCA_s \cdot Q_{calc_k} \cdot \left(A_k / A_s \right)^{ebac} + Q_{calc_k} \cdot \left[1 - \left(A_k / A_s \right)^{ebac} \right] \quad (19)$$

onde $Q_{at_{k,s}}$ é o valor atualizado da vazão na rede de drenagem na minibacia k , localizada a montante do ponto s ; A_k é a área de drenagem acumulada na minibacia k ; A_s é a área de drenagem acumulada na minibacia de exutório da sub-bacia, onde existem dados observados e $ebac$ é um parâmetro que assume valores maiores ou igual a zero e que deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre as vazões previstas e observadas.

A Figura 23 apresenta o efeito do método de assimilação na correção da vazão na rede de drenagem para diferentes valores do parâmetro $ebac$ e áreas relativas (A_k/A_s), considerando um caso hipotético onde FCA é igual a 1,2. Pode-se observar que com o aumento de $ebac$ é dado menor peso às correções de minibacias com menores áreas. Quando o parâmetro $ebac$ é igual a zero, a vazão na rede de drenagem em todas as minibacias é corrigida integralmente pelo fator FCA , no caso 1,2.

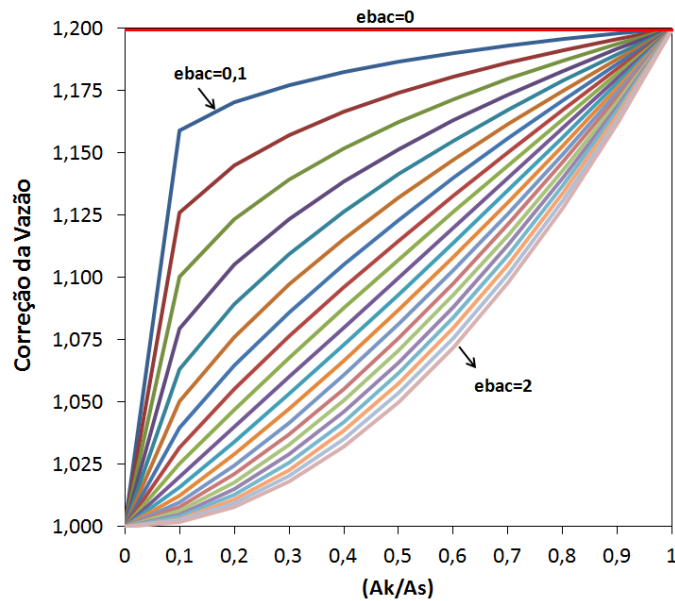


Figura 23. Correção da vazão na rede de drenagem em função da área de drenagem acumulada e do parâmetro $ebac$. O intervalo de variação do parâmetro $ebac$ entre curvas no gráfico é 0,1.

Na atualização do volume de água armazenada nos três reservatórios conceituais do modelo é utilizado o mesmo fator de correção (FCA) aplicado à atualização da vazão na rede de drenagem. Para os reservatórios, no entanto, a ponderação ocorre em função da fração do escoamento originária dos reservatórios, representada pela variável PB . A correção dos volumes dos reservatórios conceituais é dada por:

$$\text{Se } PB_k > PBlim \text{ então } VBat_{k,s} = (FCA_s)^{bx} \cdot VB_k \cdot (PB_k) + VB_k \cdot (1 - PB_k) \quad (20)$$

$$\text{Se } PB_k \leq PBlim \text{ então } VBat_{k,s} = VB_k \quad (21)$$

onde $VBat_{k,s}$ é o volume atualizado no reservatório conceitual na minibacia k , situada a montante de s ; VB_k é o volume calculado do reservatório conceitual na minibacia k ; PB_k é a fração da vazão na rede de drenagem originária do reservatório conceitual; $PBlim$ é a fração mínima de água necessária para que haja a correção dos reservatórios conceituais do modelo e bx é um parâmetro de atualização com valores entre 0 e 1, que deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre as vazões previstas e observadas.

De acordo com Paz et al. (2007), quando o parâmetro bx assume valores próximos de 1, a atualização dos volumes dos reservatórios conceituais do modelo é relativamente rápida. Quando assume valores próximos à zero, a intensidade das correções diminui.

5.2.2 Análise do método de assimilação de dados

Nessa atividade é proposta uma análise do procedimento de assimilação de dados aplicado à bacia estudo de caso, que inclui a previsão de vazão com diversos conjuntos pré-estabelecidos dos parâmetros do método (*ebac*, *bx* e *PBlim*), para um período onde estejam disponíveis dados observados de vazão. São adotadas como previsões de precipitação cenários como a previsão com chuva perfeita e com chuva zero. O termo chuva perfeita refere-se à utilização da chuva observada como se fosse prevista, simulando-se um cenário de previsão no qual as previsões de chuva não apresentam erros. O termo chuva zero, por sua vez, refere-se a um cenário onde a chuva prevista é igual a zero em todos os intervalos de tempo da previsão até o horizonte da previsão. Como resultado final dessa análise, é possível estabelecer, hipoteticamente, qual o desempenho esperado na previsão de vazões com dados de previsão de precipitação, além do melhor conjunto de parâmetros do método de assimilação de dados.

Na análise proposta, o melhor conjunto de parâmetros do método de assimilação é obtido a partir da avaliação do resultado de previsões de vazão com chuva perfeita utilizando diversos conjuntos de parâmetros. Os valores dos parâmetros do método nesses conjuntos são definidos a partir dos intervalos de variação mais frequente encontrados na literatura (e.g. Andreolli, 2003; Paz et al 2007). As previsões são avaliadas em pontos definidos da rede de drenagem que disponham de dados observados de vazão.

Como medidas de desempenho para avaliação das previsões de cheia são utilizados o Coeficiente de Nash Sutcliffe (NS), o Coeficiente de persistência (CP) e os Erros Médio (EM) e o Erro Médio Quadrático (EMQ), descritos anteriormente no item 2.5.1.1. No cálculo desses índices, somente são utilizadas previsões onde a vazão observada em alguma das antecedências supera um

patamar de vazão previamente estabelecido, caso contrário, a previsão é descartada na análise. Dessa forma, os conjuntos de parâmetros são avaliados considerando uma determinada faixa de magnitude de vazões, como por exemplo, a que representa um cenário de cheias na bacia. Como indicador da situação de cheias podem ser usadas vazões com determinada frequência ou tempo de retorno. Outra condição necessária para que seja utilizada a previsão na análise proposta é a disponibilidade de dados de vazão observados próximo ao intervalo de realização da previsão, para realização da atualização das variáveis de estado do modelo.

Para definição da melhor configuração de parâmetros dentre os diversos conjuntos arbitrados, são criados quatro *rankings*, um para cada medida de desempenho utilizada. Nesses *rankings*, a posição dos conjuntos de parâmetros é definida de acordo com o valor médio da medida de desempenho ao longo de todo horizonte. Conjuntos que apresentam melhor desempenho assumem menores colocações no *ranking*. O melhor conjunto de parâmetros é definido como aquele que apresenta o menor valor na soma de seu posicionamento para os quatro *rankings*.

Para fins de comparação com as previsões com chuva perfeita, são ainda efetuadas previsões em outros três cenários, que são:

- previsão com chuva zero: nesse cenário há atualização das condições iniciais do modelo, mas as previsões são realizadas como se não ocorresse precipitação ao longo do horizonte de previsão. Nessas previsões é utilizada a configuração de parâmetros do método de assimilação que apresentou o melhor resultado no cenário de previsão com chuva perfeita;
- previsão sem assimilação de dados: equivale à previsão de vazões com chuva observada (“chuva perfeita”) e com o modelo chuva-vazão em modo off-line, ou seja, sem atualização de suas condições iniciais pelo método de assimilação de dados;
- previsão com base na persistência: todos os valores de vazão previstos ao longo do horizonte de previsão são iguais à vazão observada no intervalo de tempo de realização da previsão (t_0).

5.2.3 Previsão de precipitação

A metodologia para geração das previsões de cheia por conjunto nessa pesquisa consiste em alimentar o modelo hidrológico MGB-IPH com um conjunto de previsões meteorológicas oriundas de saídas de diferentes modelos de previsão numérica do tempo, com diferentes condições iniciais e parametrizações. Dada a grande quantidade de informações que normalmente incluem bases de dados envolvendo a previsão meteorológica, foram desenvolvidas rotinas computacionais de pré-processamento, que automatizam a extração e preparação dos dados de previsão de precipitação no formato adequado para serem utilizados na rotina de previsão de vazões do modelo hidrológico. A rotina realiza uma série de operações, entre elas, alteração da discretização temporal dos dados de

previsão de precipitação e a interpolação dessas informações para cada centróide de minibacia usando o método do Inverso do Quadrado da Distância-IDW. A metodologia para espacialização dos dados é similar à utilizada pela rotina INTERPLU, apresentada anteriormente.

Esta pesquisa não tem como um de seus objetivos principais a caracterização do desempenho individual das previsões de precipitação utilizadas, mas sim a avaliação do desempenho do conjunto de previsões como um todo na geração de previsões probabilísticas de cheias. Nesse sentido, é proposta uma análise simplificada do desempenho de duas previsões determinísticas, tomadas como representativas do conjunto de previsões de precipitação utilizadas, que são: (a) a média do conjunto, que representa o cenário mais provável do conjunto de previsões de precipitação; e (b) uma previsão determinística de referência, usada como parâmetro de comparação na avaliação do desempenho tanto da previsão de precipitação por conjunto como da previsão de cheia por conjunto.

Na avaliação do desempenho das previsões de precipitação, as análises são realizadas ponto a ponto, no local correspondente aos centróides das minibacias do modelo hidrológico, tendo como referência os dados de precipitação observados interpolados para esses mesmos pontos. É utilizada a precipitação acumulada em um intervalo de tempo compatível com o tempo de concentração da bacia. Como sugerem os trabalhos de Pinto et al. (2005) e Paz & Collischonn (2011), o desempenho das previsões é avaliado sob dois aspectos distintos: (a) ocorrência ou não do evento de precipitação e, (b) quantidade de chuva precipitada. A avaliação das previsões com relação ao aspecto (a) verifica a habilidade da estimativa quanto à distinção da ocorrência ou não de precipitação (Paz et. al, 2007). Dessa forma, a precipitação é considerada como um evento dicotômico, sendo criadas tabelas de contingência 2x2 para diferentes situações, considerando um limiar para diferenciar a ocorrência ou não de precipitação. A partir dessas tabelas são estimadas quatro medidas de desempenho: Proporção de Acertos-H, Probabilidade de Detecção-POD, Razão de Alarme Falso-RAF e BIAS, cujas formulações, significados e valores esperados são mostrados na Tabela 1, apresentada anteriormente.

A análise proposta em (b) avalia o desempenho da previsão em estimar a quantidade de precipitação ocorrida. Para avaliação do desempenho são usados o Erro Médio-EM e o Erro Médio Quadrático. Essa análise é complementada por:

- um diagrama de dispersão observação *versus* previsão;
- uma análise do erro médio para diferentes intensidades de precipitação e antecedências.

Os resultados obtidos da análise ponto a ponto são ainda apresentados na forma de mapas, usados para identificação de padrões espaciais de desempenho das previsões na bacia.

5.2.4 Previsão de cheias por conjunto

A incerteza nos resultados das previsões de um modelo hidrológico deve-se a vários fatores, entre eles suas condições iniciais, a estrutura do modelo e sua parametrização além dos dados de entrada. Na linha de outros trabalhos (e.g. Gouweleeuw et al. 2005; Komma et al. 2007; Verbunt et al. 2007; Jaun et al., 2008; Davolio et al., 2008; Pappenberger et al. 2008; Dietrich et al. 2009; Younis et al, 2008; Thiemig et al, 2010; Bao et al., 2011; Schellekens et al., 2011; Zhao et al. 2012), a abordagem aqui utilizada atribui à previsão meteorológica a principal fonte de incerteza na previsão de cheias, sendo desprezadas outras fontes na geração do conjunto hidrológico. Considera-se ainda que todos os membros do conjunto meteorológico/hidrológico são equiprováveis.

A proposta metodológica para geração das previsões de cheia por conjunto se baseia na realização de previsões de vazão retrospectivas com o modelo MGB-IPH, utilizando como dados de entrada previsões de precipitação de diferentes modelos meteorológicos (conjunto meteorológico), dando origem a um conjunto de previsões hidrológicas (conjunto hidrológico). É também utilizada uma previsão de precipitação determinística, usada como parâmetro de referência na avaliação do desempenho das previsões por conjunto. Os conjuntos de parâmetros do modelo hidrológico assim como do método de assimilação de dados utilizados são aqueles obtidos na calibração do modelo e na análise do método de assimilação de dados. Na estimativa das condições iniciais do modelo bem como durante a previsão de cheias, variáveis como temperatura, velocidade do vento e outras assumem os valores das normais climatológicas. Embora as previsões de vazão sejam realizadas continuamente para todo o período onde estão disponíveis dados de previsão de precipitação, as previsões de vazões são analisadas somente durante o período chuvoso do ano hidrológico, tendo em vista que o foco da pesquisa está relacionado à previsão de cheias. Essa forma de análise evita que os resultados das medidas de desempenho sejam tendenciosos, desconsiderando eventos durante períodos de estiagem. A Figura 24 resume a metodologia para geração das previsões de cheia por conjunto.

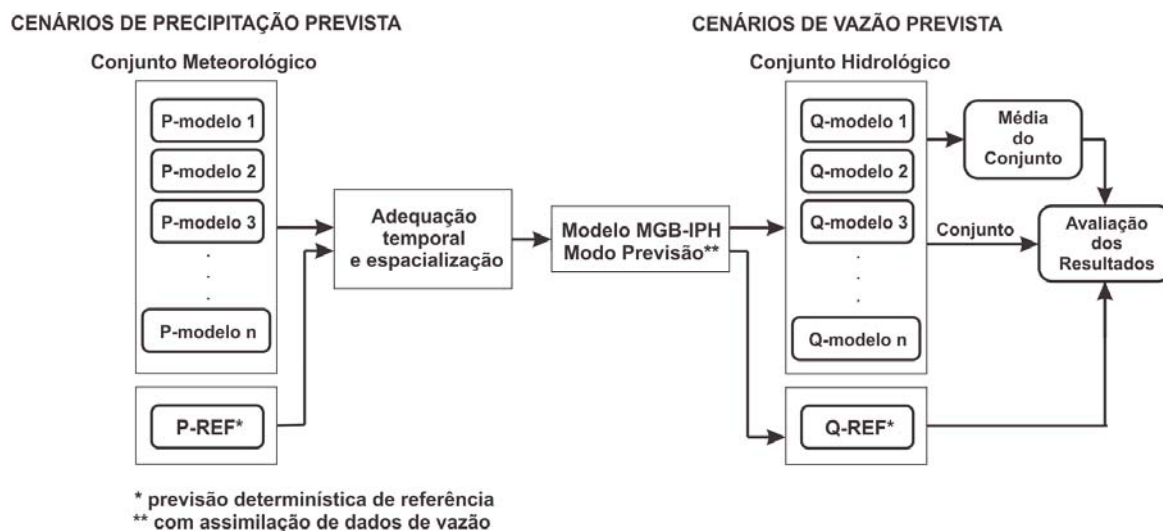


Figura 24. Metodologia para geração das previsões por conjunto.

As vazões ou níveis limites de alerta são elementos comumente utilizados na tomada de decisão sobre a emissão de alertas de cheias. Representam diferentes situações hidrológicas associadas à magnitude dos eventos de cheia ou de seus impactos à população residente ou à infraestrutura existente. O intuito principal da definição de valores limites nessa pesquisa é o de avaliar o desempenho das previsões hidrológicas em eventos do tipo dicotômicos, que consideram a superação ou não de determinado nível de alerta de cheia. Esses limites também são usados na avaliação do desempenho das previsões em diferentes faixas de magnitude de vazões, informando a performance das previsões em diferentes condições hidrológicas.

A definição de níveis de alerta foi realizada através de uma análise de frequência da série de vazões no posto fluviométrico onde são avaliadas as previsões, como proposto por Roulin (2007) e Renner et al. (2009). Uma das vantagens dessa metodologia, é a garantia de existência de um número mínimo de eventos que superem os limites estabelecidos durante a verificação das previsões (Renner et al., 2009). Nessa pesquisa foram adotados 4 limites, associadas aos quantis com probabilidade de não-excedência de 80%, 95%, 98% e 99% da série temporal de vazões observadas, referidos respectivamente ao longo do texto como Q20%, Q5%, Q2% e Q1%.

A metodologia para análise dos resultados das previsões por conjunto está dividida em quatro partes principais:

- 1) Caracterização dos períodos chuvosos: É realizada uma análise geral dos períodos chuvosos, caracterizando temporalmente os principais eventos hidrológicos registrados, assim como as vazões máximas atingidas;

2) Análise visual: São avaliados visualmente os resultados das previsões para alguns dos eventos hidrológicos mais expressivos, ou seja, aqueles onde ocorreram as maiores vazões de pico. As previsões são apresentadas na forma de gráficos *spaghetti*, onde constam, além dos membros do conjunto hidrológico, o conjunto médio e a previsão determinística de referência;

3) Avaliação determinística, subdividida em três análises:

a) Análise do desempenho do conjunto médio para diferentes faixas de magnitude de vazões. As medidas de desempenho utilizadas são: o Coeficiente de Nash-Sutcliffe-NS, o Coeficiente de Persistência-CP, o Erro Médio-EM e o Erro Médio Quadrático-EMQ;

b) Análise comparativa do desempenho da média do conjunto hidrológico com a previsão determinística de referência, a previsão com chuva perfeita (observada nos postos telemétricos) e com chuva zero. São usadas como medidas de desempenho NS, CP, EM e EMQ para determinada faixa de magnitude de vazões;

c) Análise comparativa do desempenho da média do conjunto em relação a cada um membros, através de um Coeficiente de Eficiência-CM, similar a CP, para determinada faixa de magnitude de vazões. A Equação 22, a seguir, define CM:

$$CM_i = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (o_i - p_i)^2}{\sum_{n=1}^N (o_i - p_i^m)^2} \quad (22)$$

onde p é o valor previsto; o é o valor observado; p^m é o valor previsto pela média do conjunto hidrológico; i é a antecedência da previsão e N o número total de previsões. Valores positivos de CM indicam melhor desempenho do membro avaliado em relação a média do conjunto. Valores negativos, por outro lado, indicam melhor desempenho do conjunto médio.

4) Avaliação probabilística: São usados para avaliação dos resultados das previsões por conjunto o Diagrama de Dispersão, o SBD (Spread-Bias Diagram), o Brier Skill Score-BSS e o Diagrama ROC, para determinadas antecedências e vazões limites. No cálculo do BSS, é utilizada como previsão de referência a previsão determinística. Nas análises com o Diagrama ROC, os resultados das previsões por conjunto são comparados aos resultados das previsões determinística de referência e da média do conjunto.

A avaliação dos resultados realizadas nos itens de (1) a (4) é ainda complementada ainda por uma análise das previsões determinística de referência e por conjunto através do Diagrama de

Excedência (vide Figura 15). O Diagrama de Excedência consiste em uma matriz-tabela, onde são apresentadas sequencialmente os resultados de vinte previsões de vazão, como mostra o exemplo da Figura 25. As datas de início das previsões aparecem à esquerda do diagrama, e na parte superior, a data e horário dos intervalos de tempo das previsões (antecedências). Cada célula da matriz representa intervalos de 12h das previsões. No caso da previsão determinística, as células do diagrama são coloridas de acordo com a maior vazão limite superada em 12h. No caso da previsão por conjunto, a previsão é relativa sempre a um mesmo limiar e a escala de cores é associada à porcentagem máxima do número de membros que superaram o limiar em um único intervalo de tempo ao longo de 12h, que aparece no interior das células. Na parte superior do diagrama aparecem ainda a data e o horário dos intervalos de tempo onde ocorreram as superações dos limiares de acordo com as observações. O Diagrama de Excedência utilizado nesse trabalho é uma adaptação daquele utilizado operacionalmente pelo *European Flood Alert System* apresentado em Ramos et al. (2007), Younis et al. (2008) e Thielen et al. (2009).

5.2.5 Análise do impacto da redução do número de membros

Previsões por conjunto envolvendo um grande número de membros podem ser dispendiosas e exigir uma grande capacidade computacional, o que pode trazer dificuldades em um ambiente operacional de previsões (Wilks, 2006; Verbunt et al., 2007; Brochero et al. 2011). Esse tipo de contratempo tem sido abordado na literatura através do uso de técnicas de seleção de membros representativos. A análise empreendida nesse item se propõe a quantificar o efeito no desempenho das previsões por conjunto ocasionado por reduções de 50% e 75% do número total de membros através de uma amostragem aleatória pelo método de *bootstrap*. Para exemplificar a metodologia considere-se uma redução de 50% do número de membros. Para um período com “n” eventos de previsão, são excluídos aleatoriamente, de cada evento, 50% dos membros disponíveis. A série de “n” eventos de previsão com 50% dos membros resultante desse procedimento é avaliada através do Brier Skill Score-BSS, considerando como previsão de referência o conjunto com todos os membros. Esse ciclo é repetido 1000 vezes, como sugerido por Jaun et al.(2008). Os resultados de BSS para os 1000 conjuntos de previsões com redução do número de membros são avaliados em termos da média e dos quantis de 10% e 90%. A mesma análise é replicada considerando uma redução de 75% dos membros.

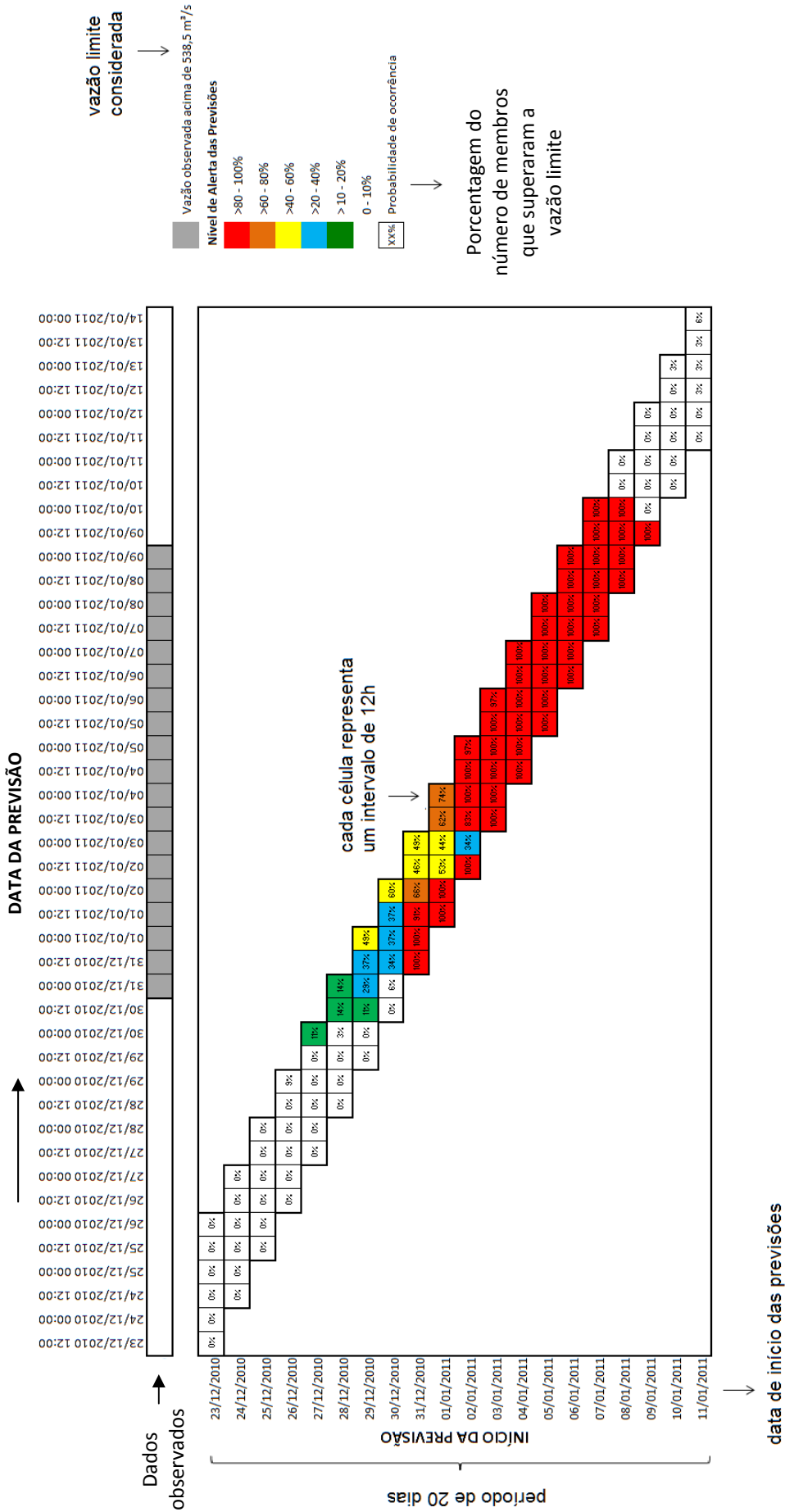


Figura 25. Exemplo de um Diagrama de Excedência utilizado para análise e divulgação dos resultados de previsões por conjunto.

Capítulo 6

Estudo de Caso

Esse capítulo está dividido em duas partes principais. Na primeira parte é apresentada a bacia estudo de caso e sua caracterização física e hidroclimática. Na segunda parte são apresentadas as bases de dados disponíveis utilizadas na pesquisa.

6.1 Características gerais

A Bacia do rio Paraopeba possui área de 12.150km² e situa-se na região centro-sul do Estado de Minas Gerais, entre as longitudes 43°O e 45°O e latitudes 18°S e 21°S. O rio Paraopeba é afluente pela margem direita do rio São Francisco e se inclui na região fisiográfica do Alto São Francisco. Essa região compreende a porção da bacia do rio São Francisco que vai de suas nascentes no sul do Estado de Minas Gerais até o município de Pirapora-MG, a jusante do reservatório de Três Marias. A Figura 26 apresenta a divisão da bacia do rio São Francisco em regiões fisiográficas e os principais aproveitamentos hidrelétricos existentes. A Figura 27 apresenta o mapa de localização da bacia do rio Paraopeba e sua posição relativa ao Estado de Minas Gerais e a bacia do Rio São Francisco.

O rio Paraopeba possui orientação noroeste e tem extensão total, da cabeceira à foz, de cerca de 500km. Entre seus principais afluentes estão os rios Pardo, Manso, Brumado, Camapuã e Maranhão. O rio tem suas nascentes no município de Cristiano Ottoni e sua foz no reservatório de Três Marias, no município de Felixlândia. Ao todo estão inseridos parcialmente ou integralmente na bacia 44 municípios (IGAM, 2005), sendo os mais populosos Contagem, com cerca de 608.000hab, e Betim, com cerca de 380.000hab (IBGE, 2012). A Figura 28 apresenta o perfil longitudinal do rio Paraopeba localizando alguns de seus afluentes e postos fluviométricos. O tempo de concentração da bacia é de cerca de 45h.

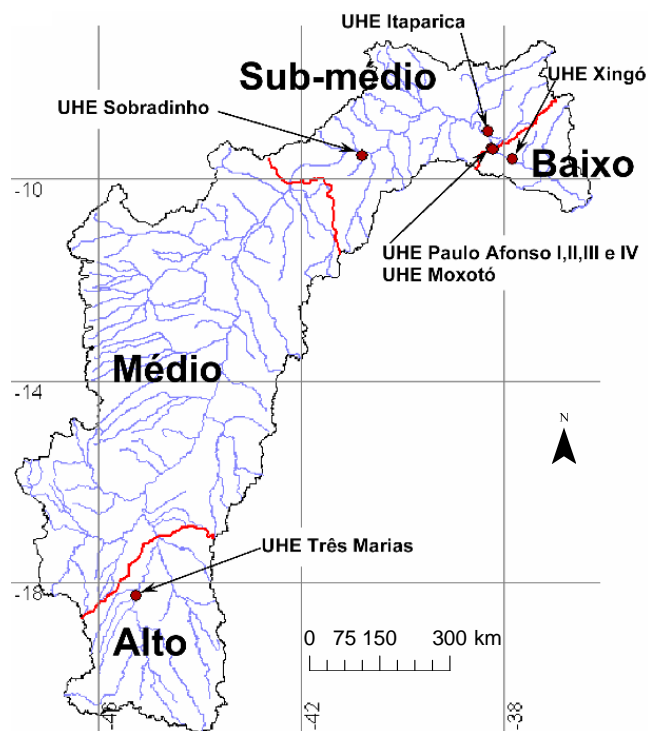


Figura 26. Regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco e principais aproveitamentos hidrelétricos. Fonte: Adaptado de Silva (2005).

O clima predominante na bacia do rio Paraopeba é do tipo tropical semi-úmido (4 a 5 meses secos) (IBGE, 2002), com sazonalidade bem definida. O período chuvoso ocorre entre os meses de outubro a março, e o de estiagem, entre abril a setembro. O trimestre mais chuvoso ocorre de novembro a janeiro, enquanto o mais seco, entre junho e agosto. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 29, que apresenta as vazões médias mensais do rio Paraopeba na estação fluviométrica Ponte da Taquara (Cód. ANA 40850000 – Área de Drenagem=8.720km²). Essa é a estação de monitoramento mais próxima da foz do rio Paraopeba com uma longa série de dados diários de vazão (~40 anos) disponíveis no banco de dados da ANA. A vazão média de longo termo nesse local é de 124m³/s. A Figura 30 apresenta o ajuste da distribuição de probabilidades de Gumbel pelo Método dos Momentos às vazões diárias máximas anuais dessa estação. O ajuste da distribuição foi verificado pelos testes de aderência de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov ao nível de significância de 0,025, sendo aceita a hipótese nula de que a variável pode ser representada pela distribuição de Gumbel.

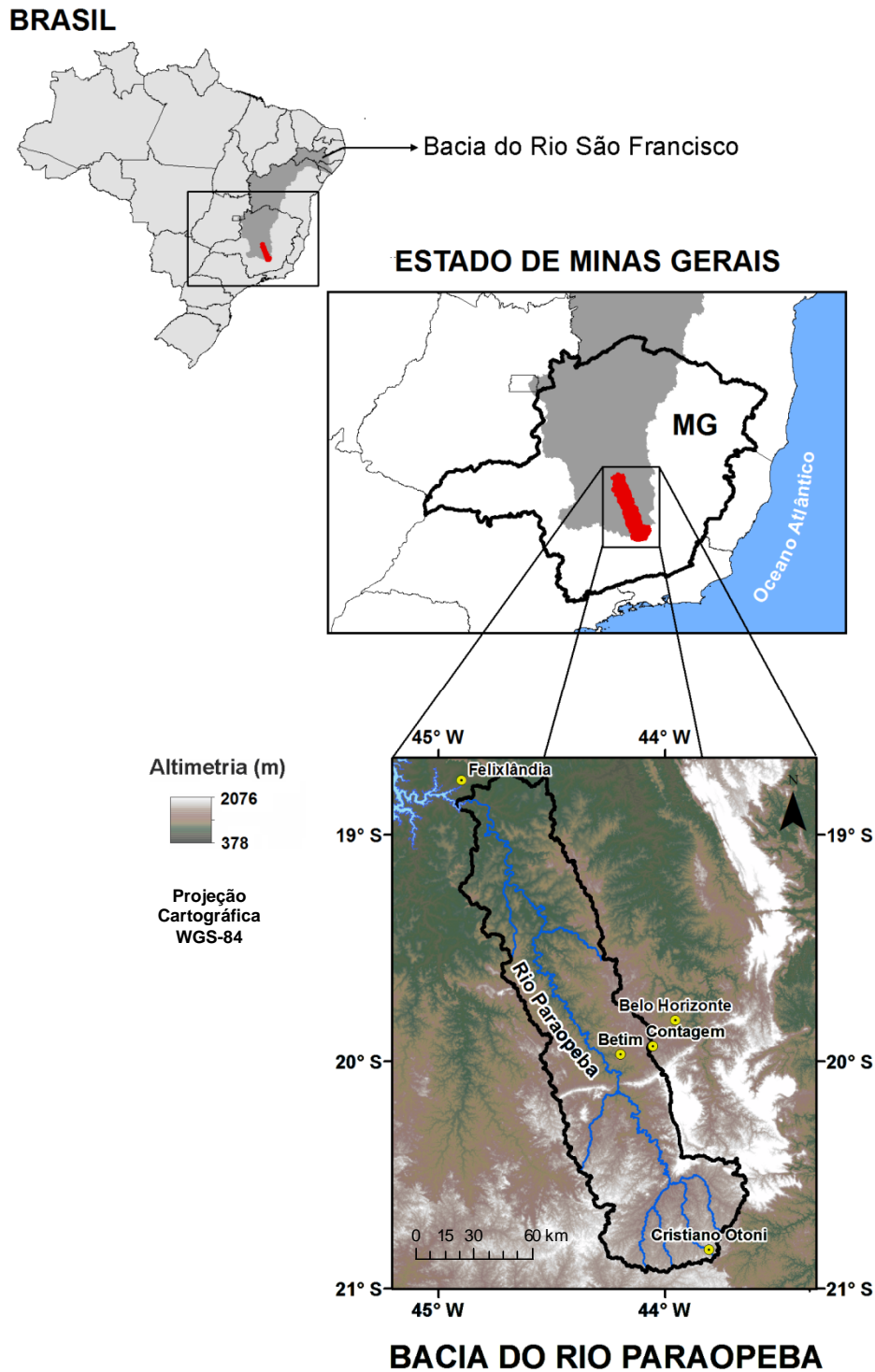


Figura 27. Mapa de situação da bacia do rio Paraopeba.

A precipitação média anual na bacia entre 1977-2006, calculada com base nos dados do projeto Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM, 2011), é de 1413mm, havendo um decréscimo evidente dos índices pluviométricos no sentido sul-norte, como mostra a Figura 31. Os maiores volumes de precipitação na bacia ocorrem nas regiões sul e sudeste da bacia e em toda a extensão das serras que atravessam a bacia no sentido Leste-Oeste, próximo a latitude 20°S, onde

precipitações médias anuais alcançam até 1800mm. Já na região norte da bacia, próximo ao reservatório de Três Marias, são observados os menores volumes médios anuais de precipitação, próximos a 1200mm.

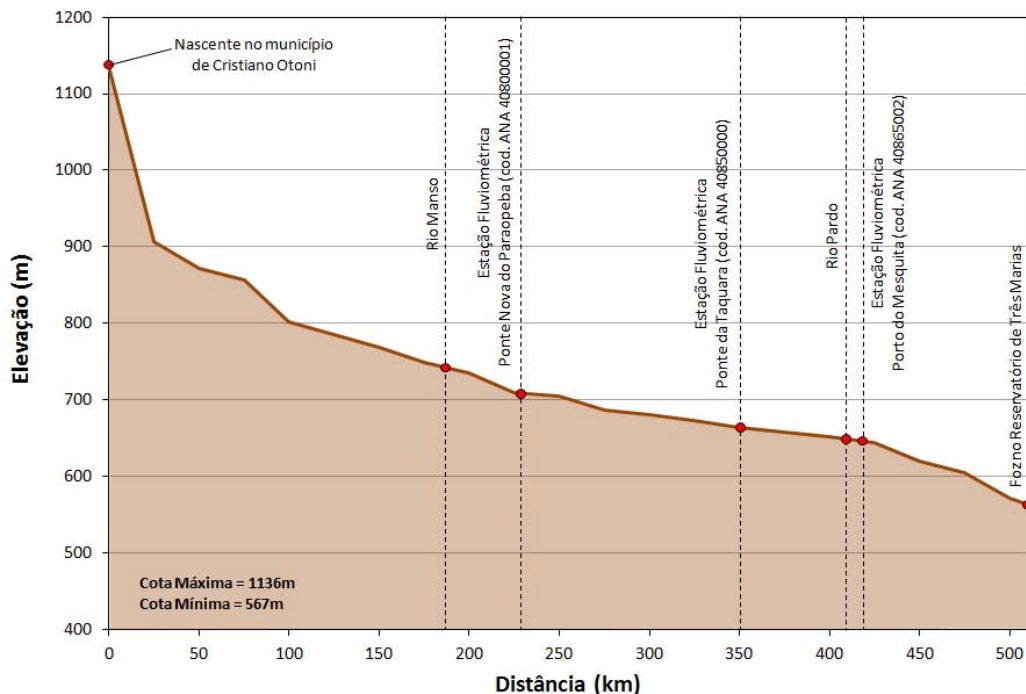


Figura 28. Perfil longitudinal do rio Paraopeba.

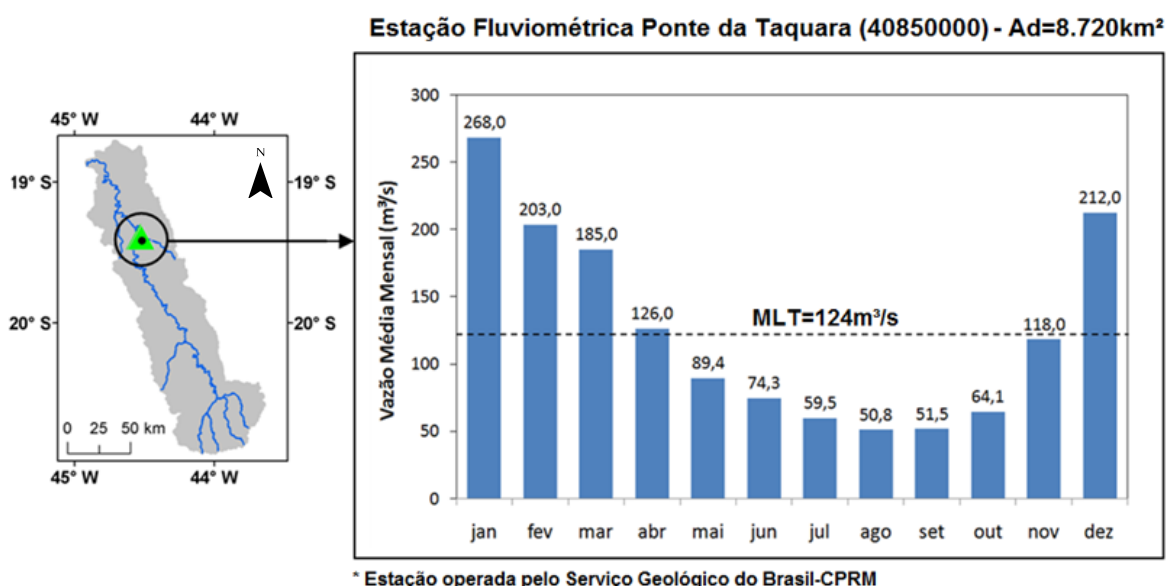


Figura 29. Vazões médias mensais na estação fluviométrica Ponte da Taquara (40850000), calculadas com base na série de vazões diárias consistidas entre 1967-2005.

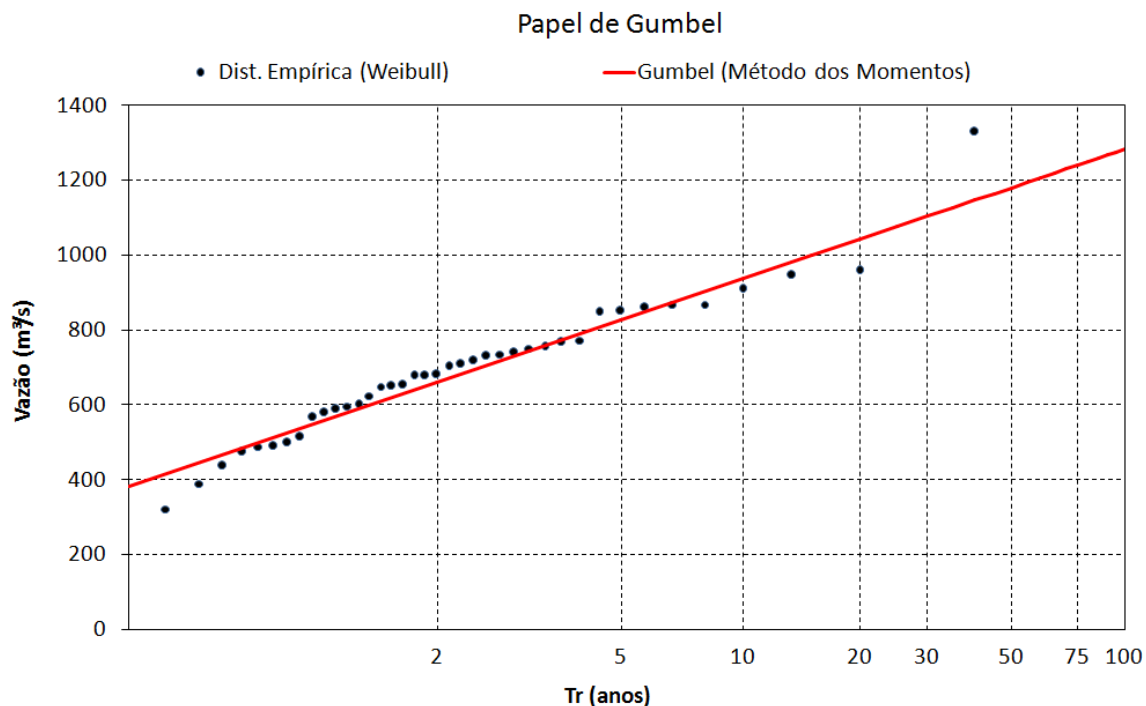


Figura 30. Ajuste da distribuição de Gumbel à série de vazões máximas diárias anuais da estação Ponte da Taquara (40850000).

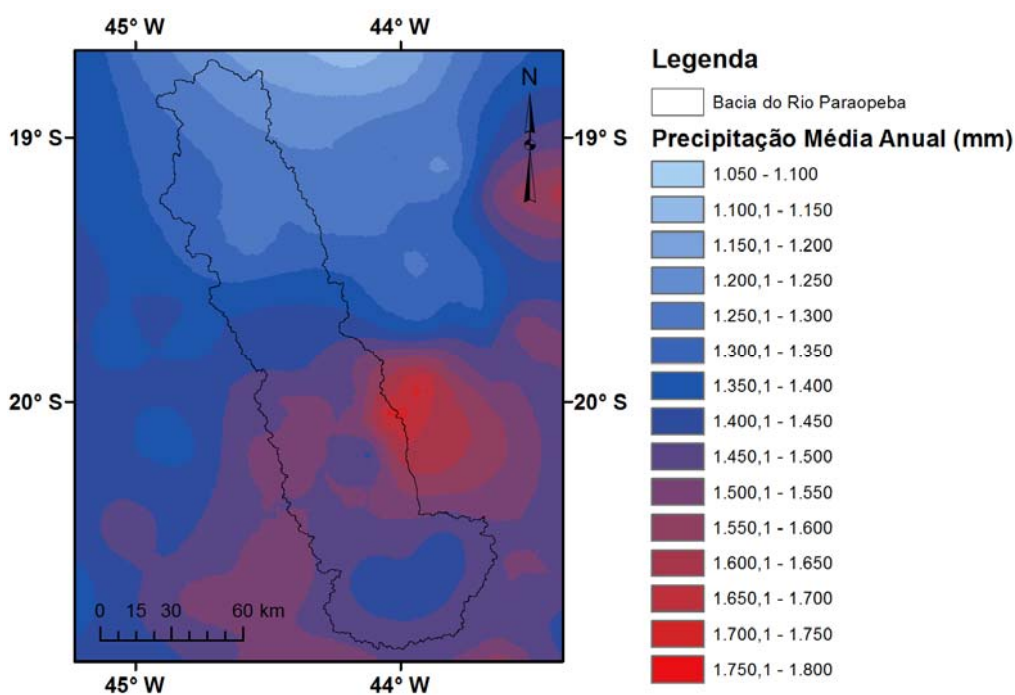


Figura 31. Precipitação média anual na região da bacia do rio Paraopeba. Fonte: CPRM (2011).

A ocorrência de chuvas na região da bacia é significativamente influenciada pela orografia, tendo em vista sua localização entre as Serras da Canastra (a noroeste) e a Serra da Mantiqueira (a

Sudeste). Durante o verão há a ocorrência de chuvas intensas na região, muitas vezes prolongadas por vários dias (Nunes et al., 2009).

A temperatura média anual na bacia é de cerca de 21°, sendo que as maiores temperaturas (~23°C) se localizam na região norte, próximo ao reservatório de Três Marias, e as menores, mais ao sul (~19°C), nas regiões de maiores altitudes.

6.2 Dados utilizados

Esse item descreve as fontes e características principais das informações usadas na aplicação do modelo hidrológico para previsões de vazão na bacia do rio Paraopeba. Os dados utilizados foram divididos em sete categorias: i) Hidrografia; ii) Modelo Digital de Elevação-MDE; iii) Uso do solo; iv) Tipo de solo; v) Dados hidrológicos; vi) Dados climatológicos; e vii) Dados de Previsão de precipitação. Os dados hidrológicos com discretização horária e a hidrografia vetorial do Estado de Minas Gerais foram cedidos pela Companhia Energética de Minas Gerais-Cemig no âmbito do projeto de pesquisa P&D-353 intitulado “Desenvolvimento de Sistema de Previsão de Vazões com Base na Integração de Sistema de Telemetria a Modelos Hidrológicos e de Previsão Climática”. O referido projeto trata, entre outros, da previsão de vazões em tempo real na porção da bacia do rio São Francisco até a cidade de Pirapora, a jusante do reservatório de Três Marias.

6.2.1 Hidrografia

A base de dados utilizada foi a hidrografia vetorial do Estado de Minas Gerais, na escala de 1:50.000, produzida pelo IGAM. A Figura 32 apresenta a hidrografia utilizada e a indicação de alguns de principais afluentes do rio Paraopeba.

6.2.2 Modelo digital de elevação

O modelo digital de elevação-MDE adotado foi obtido via sensoriamento remoto na missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*; Farr et al., 2007), disponível em escala global. A base possui resolução espacial de cerca de 90m, resolução vertical de 1m e projeção geográfica referenciada ao datum WGS84 (Figura 33).

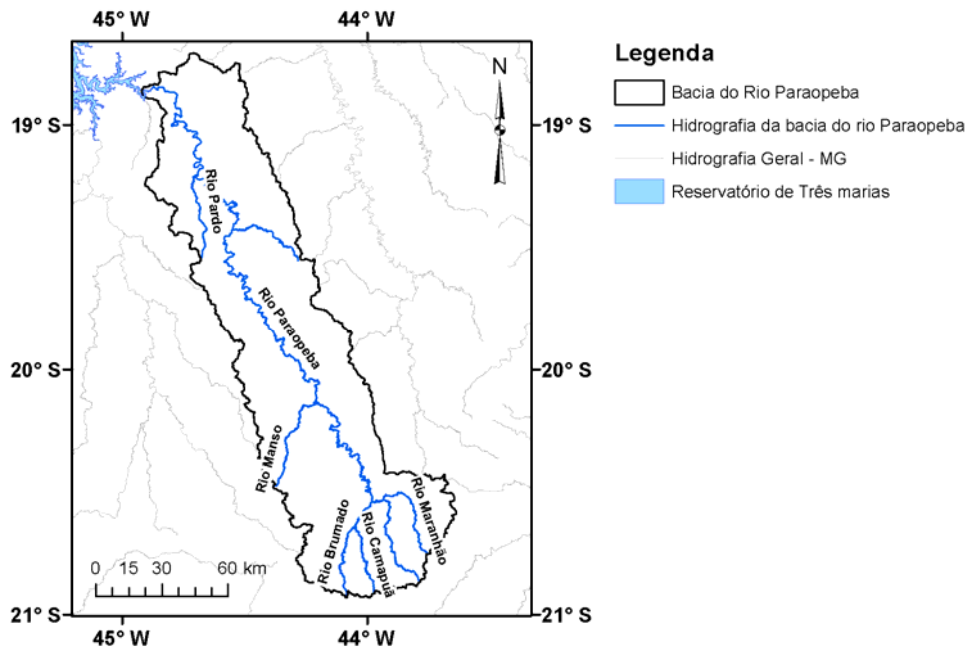


Figura 32. Hidrografia da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

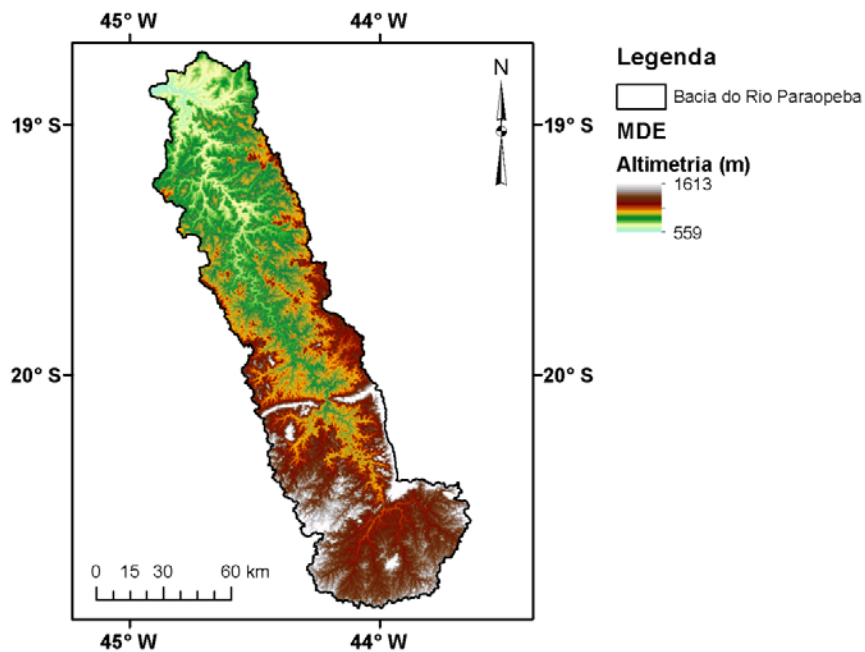


Figura 33. MDE da bacia do rio Paraopeba.

6.2.3 Tipos de solo

O mapa de tipos de solos da bacia foi obtido a partir da base de dados da Universidade Federal de Viçosa (UFV), através do portal na internet IDE-GeoMINAS (<http://www.ide.ufv.br/geominas/srv/br/main.home>). O mapa foi originalmente concebido na escala 1:1.000.000, em estudo realizado por Amaral (1993).

Para aplicações em hidrologia, normalmente, é conveniente diminuir o número de classes de solo através do agrupamento de tipos de solos com características semelhantes. Esse procedimento deve considerar o potencial de geração de escoamento superficial e de base, bem como o potencial de armazenamento de água, que são as características do solo preponderantes do ponto de vista da modelagem hidrológica. Essa operação se reflete em uma redução do conjunto de parâmetros do modelo hidrológico, trazendo um benefício importante na etapa de calibração.

A classificação dos tipos de solo por características hidrológicas semelhantes foi realizada em duas etapas principais. Inicialmente os tipos de solo da bacia foram reclassificados e reagrupados em 5 classes: 1) Cambissolos, 2) Latossolos, 3) Argissolos, 4) Litossolos e 5) áreas inundadas, indicadas pela classe água. Cada classe inclui as subclasses correspondentes. A classe indicada por Latossolos, por exemplo, agrupa os Latossolos Férricos, Latossolos Vermelho-Amarelo e Latossolos Vermelho-Escuro. A classe Argissolos, agrupa os tipos de solo Podzólicos Vermelho-Amarelo e Podzólicos Vermelho-Escuro. A Figura 34, apresenta o mapa de tipos de solo na bacia resultante do reagrupamento.

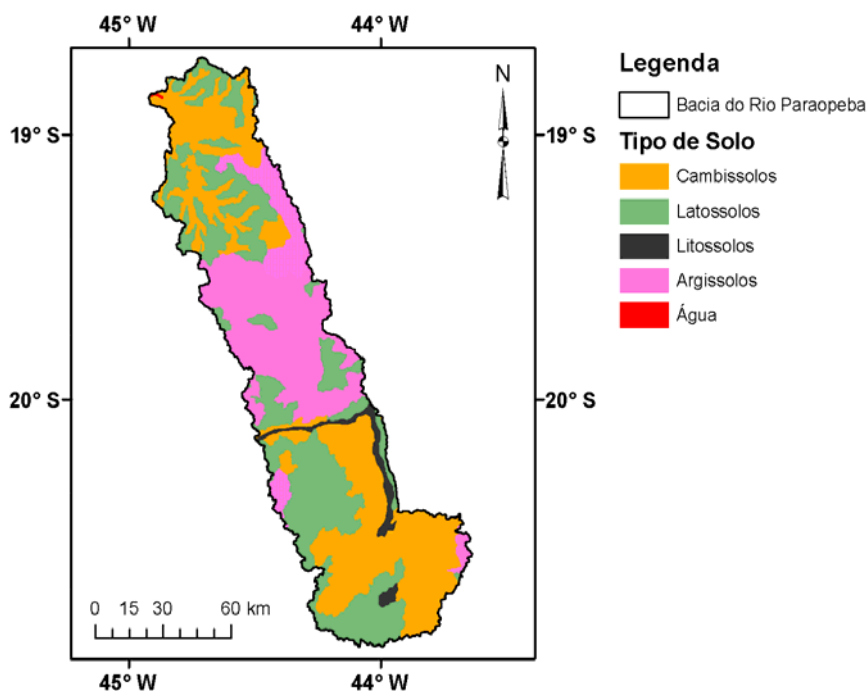


Figura 34. Mapa de tipos de solo na bacia do rio Paraopeba.

Em uma segunda etapa, as classes de solo anteriormente definidas foram reagrupadas em classes relacionadas ao potencial de geração de escoamento superficial: 1) baixo potencial de geração de escoamento ou solos profundos; 2) médio potencial de geração de escoamento ou solos de profundidade média; e 3) alto potencial de geração de escoamento ou solos rasos. As principais características dos solos identificados anteriormente, na Figura 34, são:

- Latossolos: são considerados solos arenosos, profundos e bem drenados, com baixo potencial de geração de escoamento superficial;
- Argissolos: apresentam baixo potencial de geração de escoamento superficial devido a sua alta capacidade de armazenamento, entretanto baixa capacidade de drenagem;
- Cambissolos: tem potencial de geração de escoamento superficial intermediário, devido as suas baixas profundidades e capacidade de armazenamento, e;
- Litossolos: são solos rasos, com alta capacidade de geração de escoamento superficial.

A Figura 35 e a Tabela 3 apresentam o resultado da reclassificação considerando o potencial de escoamento. Na Tabela 3 é apresentada a fração da área total da bacia ocupada por cada classe.

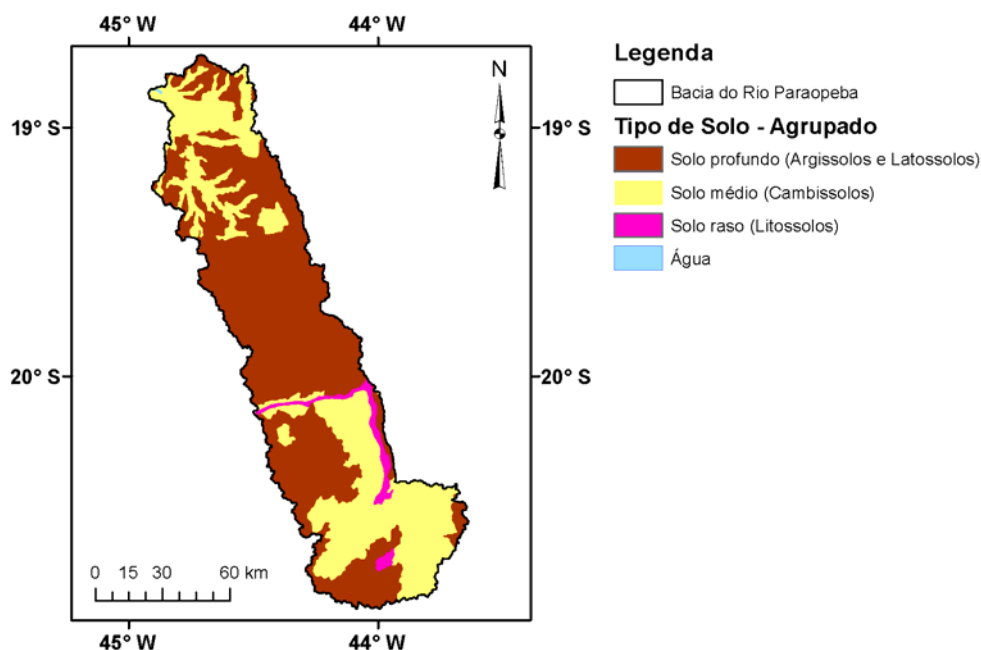


Figura 35. Mapa de tipos de solo da bacia do rio Paraopeba reclassificados em função do potencial de geração de escoamento.

Tabela 3. Fração da área total da bacia ocupada pelas classes de solos em função do potencial de geração de escoamento superficial.

Solos	Característica	Potencial de Geração de Escoamento	Fração da Área Total
Argissolos e Latossolos	Profundo	Baixo	61,4%
Cambissolo	Médio	Médio	36,1%
Litossolo	Raso	Alto	2,4%
Água	-	-	0,1%

6.2.4 Usos do solo

A base de dados de usos do solo utilizada foi o “Mapa de Vegetação de América do Sul”, desenvolvido por Eva et al.(2002). Essa base, disponibilizada em formato matricial, possui resolução espacial de aproximadamente 1 km e foi composta a partir de revisões de levantamentos de cobertura vegetal anteriores e de múltiplas imagens de satélite com diferentes resoluções e finalidades.

O mapa cobertura vegetal teve suas classes originais reagrupadas em cinco classes principais de usos: a) Agricultura; b) Florestas; c) Campos, Caatinga e Cerrado, representando vegetação de pequeno porte; d) Áreas Urbanas; e e) Corpos d’água, representado pela classe Água. Os usos predominantes na bacia são a agricultura e os campos, que incluem fragmentos de áreas de caatinga e cerrado. A Figura 36 mostra as classes de uso do solo resultantes do procedimento. A Tabela 4 apresenta a fração da área total da bacia ocupada por cada classe.

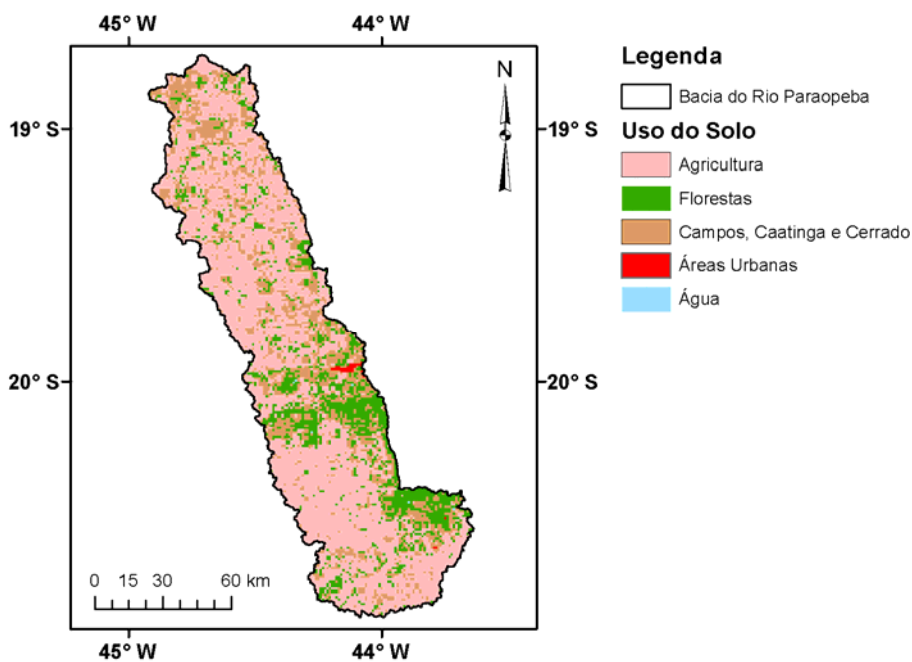


Figura 36. Mapa de uso do solo na bacia do rio Paraopeba.

Tabela 4. Fração da área total da bacia rio Paraopeba ocupada pelas classes de uso.

Tipo de Uso	Fração da Área Total
Agricultura	60,2%
Campos	23,4%
Florestas	16,0%
Área Urbana	0,3%
Água	0,1%

6.2.5 Dados hidrológicos

Foram usados dois tipos de dados hidrológicos nessa pesquisa:

- Séries horárias de vazão e precipitação, provenientes de estações telemétricas das redes de monitoramento das bacias do rio São Francisco e do rio das Velhas, operadas pela Cemig;
- Séries diárias de vazão e precipitação de estações convencionais da ANA.

Os dados horários foram utilizados nas aplicações envolvendo a modelagem hidrológica. Os dados diários foram utilizados como apoio na verificação da série de dados horários.

6.2.5.1 Dados hidrológicos horários

Dados de precipitação horários

Os dados de precipitação utilizados são provenientes de 34 estações telemétricas distribuídas na porção superior da bacia do rio São Francisco. Estão disponíveis dados no período entre 06/2000 e 06/2011. A localização dos postos pluviométricos é mostrada na Figura 37, a seguir. A Tabela 15, apresentada no Anexo 2, sumariza os postos pluviométricos e suas coordenadas geográficas.

Observa-se, da Figura 37, que o número de postos pluviométricos dentro dos limites da bacia é relativamente pequeno (4 postos), estando a maior parte dos postos disponíveis localizados nas adjacências da bacia. Entretanto a distribuição desses postos entre as diferentes porções da bacia é razoável, existindo pelo menos um posto nas porções superior, central e inferior da bacia do rio Paraopeba. A Figura 38 apresenta um Diagrama de Gantt com a disponibilidade de dados em nível anual entre os anos de 2000 e 2011. Nesse diagrama, os retângulos em preto indicam a ausência de dados. Os retângulos em tons de azul representam diferentes disponibilidades de dados, sendo que os tons mais claros indicam maior disponibilidade de dados. Observa-se que para períodos mais recentes, especialmente a partir de 2007, que a disponibilidade de dados das estações é maior. Os quatro postos localizados dentro da bacia - Porto do Mesquita, Igarapé, Ponte Nova do Paraopeba e SE-Conselheiro Lafaiete – apresentam razoável disponibilidade de dados.

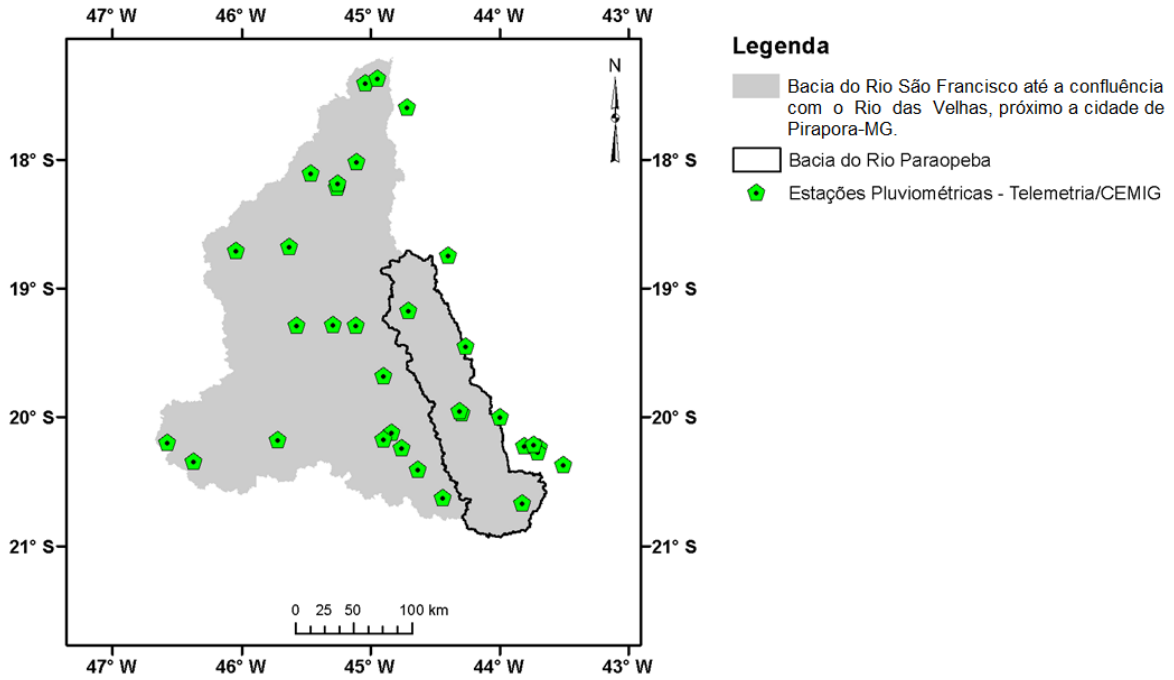


Figura 37. Localização dos postos pluviométricos utilizados na aplicação do modelo hidrológico.

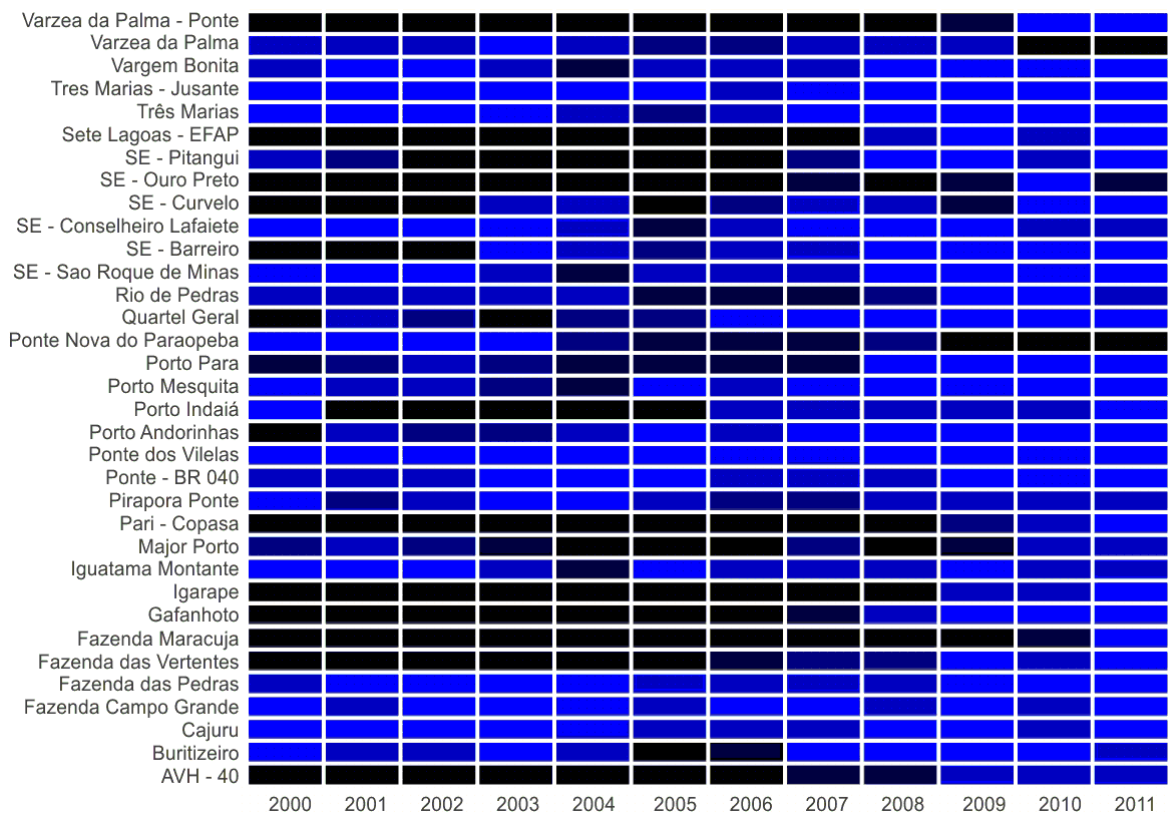


Figura 38. Disponibilidade temporal (em nível anual) de dados pluviométricos horários na bacia rio Paraopeba.

Dados fluviométricos horários

Foram utilizados dados de vazão horários das estações fluviométricas Porto do Mesquita (40865002) e Ponte Nova do Paraopeba (40800001), ambas localizadas no rio Paraopeba. A Figura 39 mostra a localização dos postos na bacia.

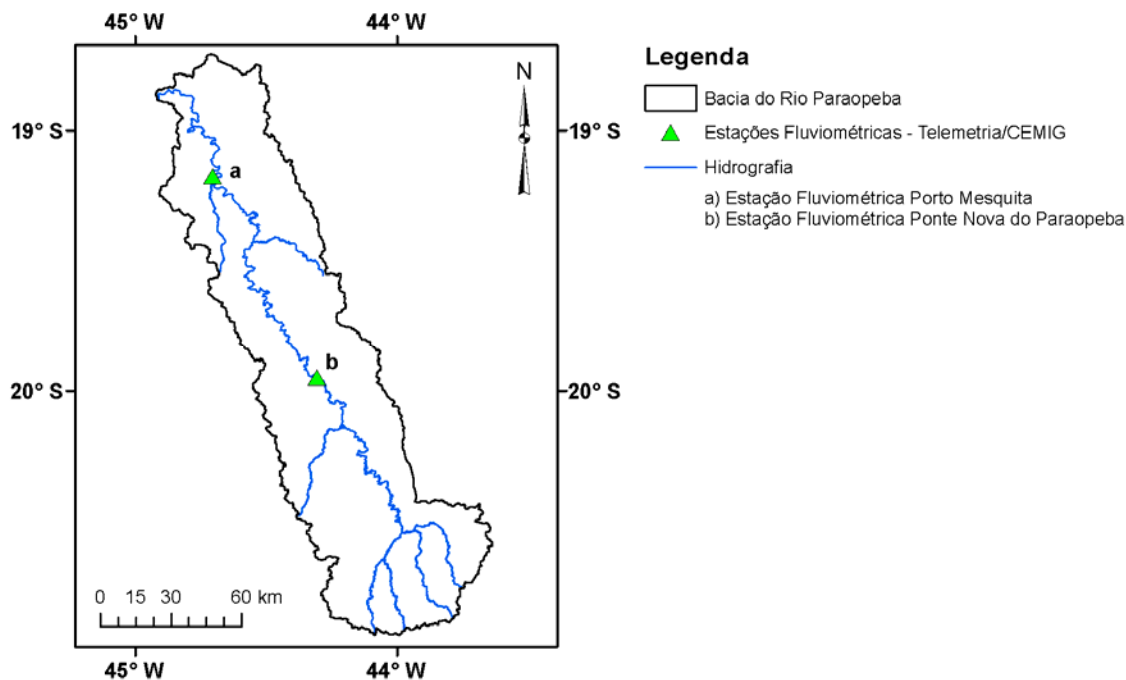


Figura 39. Localização dos postos fluviométricos na bacia do rio Paraopeba.

A Tabela 5 apresenta algumas informações a respeito dos postos fluviométricos utilizados como localização geográfica, área de drenagem e vazão média. A Figura 40 apresenta um Diagrama de Gantt mostrando a disponibilidade temporal dos dados de vazão. Pode-se observar que a estação Ponte Nova do Paraopeba apresenta uma baixa disponibilidade de dados. As falhas representam cerca de 80% do número total de intervalos de tempo horários no período entre 06/2000 a 06/2011 nessa estação. A estação de Porto do Mesquita, por sua vez, apresenta disponibilidade satisfatória, especialmente a partir do ano de 2007. As falhas nessa estação representam 13% da série de dados horários entre 06/2000 a 06/2011.

Tabela 5. Postos fluviométricos no rio Paraopeba com dados horários de vazão utilizados na aplicação do modelo MGB-IPH.

Código - ANA	Nome	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Área de drenagem (km ²)	Vazão Média* (m ³ /s)
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	-19,948°	-44,305°	5.784	70,8
40865002	Porto do Mesquita	-19,173°	-44,702°	10.280	124,2

* considerando a série de vazões horários disponível entre 2000-2011.

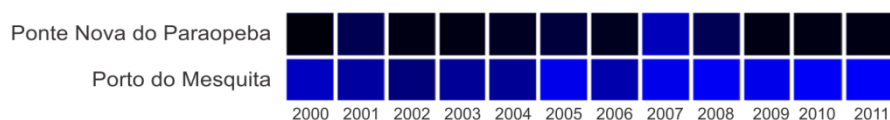


Figura 40. Disponibilidade temporal (em nível anual) de dados de vazão horários na bacia rio Paraopeba.

6.2.5.2 Dados hidrológicos diários

Dados pluviométricos diários

Foram utilizadas 173 estações pluviométricas da base de dados da ANA com dados no período entre 2000 e 2011, distribuídas na porção superior da bacia do rio São Francisco. A Tabela 17, no Anexo 2, apresenta as estações utilizadas e suas coordenadas geográficas.

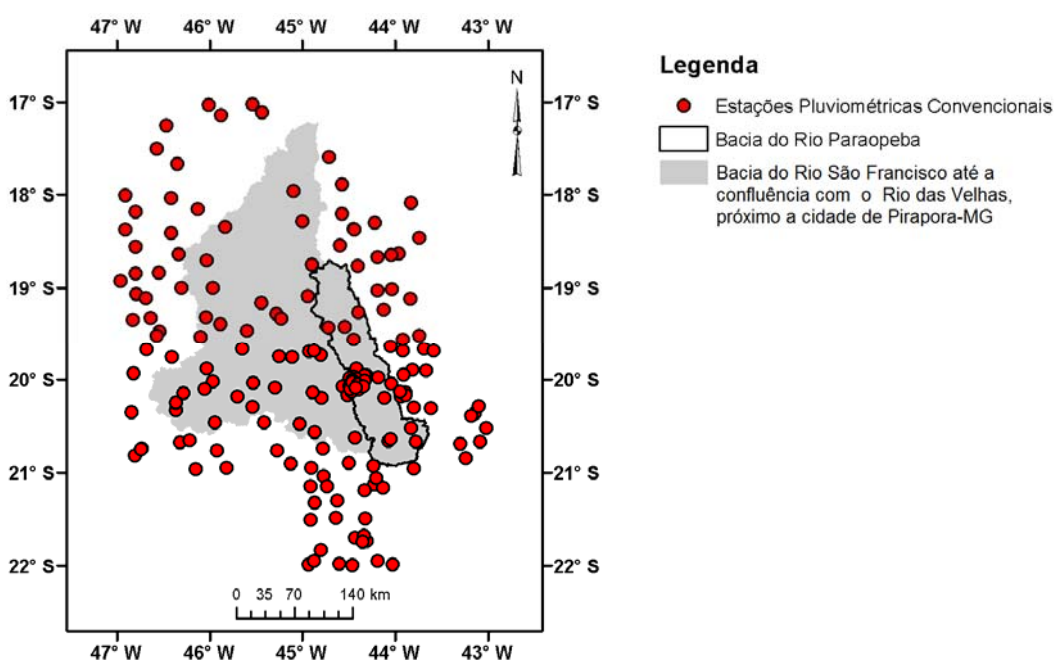


Figura 41. Localização dos postos pluviométricos convencionais utilizados na validação dos dados de precipitação horários.

Dados fluviométricos diários

Das estações fluviométricas com dados horários utilizadas, estavam disponíveis na base de dados da ANA dados de vazão diários no período entre 2000-2011 somente para a estação Ponte Nova do Paraopeba (40800001). A Figura 42 apresenta um Diagrama de Gantt mostrando a disponibilidade temporal dos dados para essa estação. A estação apresenta boa disponibilidade de dados, com maior percentual de falhas nos anos de 2007 e 2011.



Figura 42. Disponibilidade temporal (em nível anual) dos dados de vazão diários na estação fluviométrica convencional Ponte nova do Paraopeba (40800001).

6.2.6 Dados climatológicos

Como dados climatológicos, foram utilizadas as normais climatológicas mensais publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia-INMET (INMET, 1992). As normais climatológicas utilizadas representam as médias de variáveis meteorológicas para o período de 1961 a 1990 (30 anos), para 22 estações próximas à bacia do rio Paraopeba. As variáveis utilizadas foram temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação. A localização das estações climatológicas utilizadas são mostradas na Figura 43 e indicadas na Tabela 17, constante no Anexo 2. Os gráficos com os valores mensais das variáveis utilizadas são também apresentados no Anexo 2.

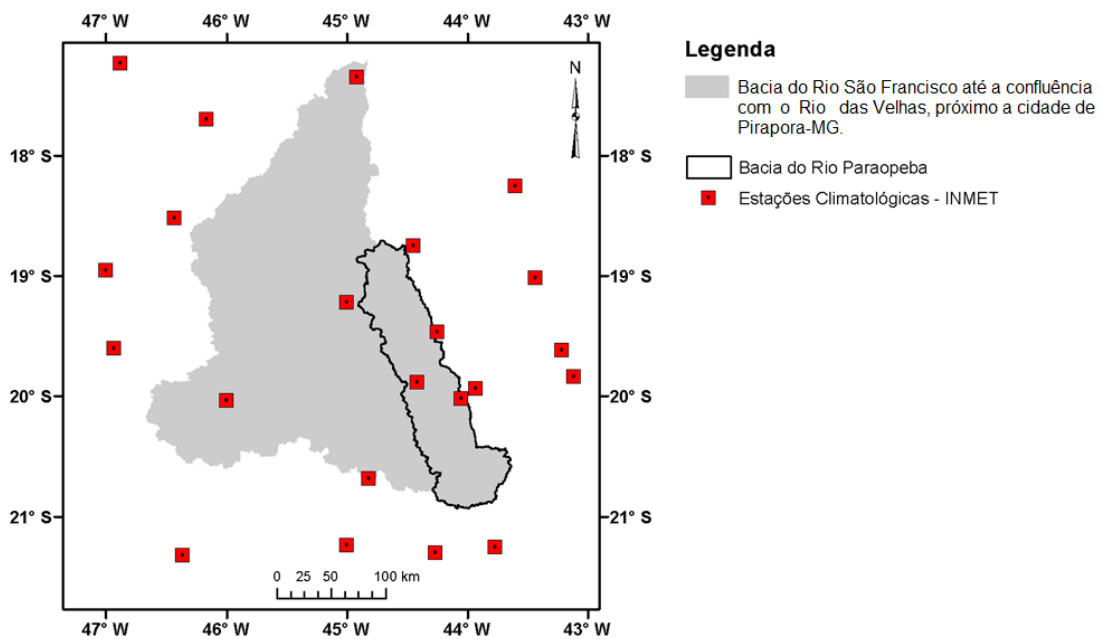


Figura 43. Localização das estações climatológicas do INMET utilizadas na pesquisa.

6.2.7 Dados de previsão de precipitação

A base de dados de previsão meteorológica utilizada nessa pesquisa compreende cerca de 40-50 saídas de modelos PNT (Previsão Numérica do tempo), que se distinguem em relação ao tipo de modelo (global ou regional), à resolução, às parametrizações utilizadas, às condições iniciais e de contorno e às perturbações do estado inicial. A organização dessa base de dados surgiu da iniciativa do Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo (MASTER-IAG/USP) em cooperação com outras instituições/centros em conduzir uma atividade de intercomparação entre modelos PNT em modo operacional (Silva Dias et al, 2006).

As previsões meteorológicas são emitidas pelos centros uma ou duas vezes ao dia (00:00 UTC ou 12:00 UTC), com horizontes entre 48 e 168h, em geral acumuladas a cada seis horas. As variáveis meteorológicas previstas são vento zonal e meridional mais representativo do nível de 10 metros, temperatura do ar e do ponto de orvalho representativo do nível de 2 metros, pressão reduzida ao nível médio do mar e precipitação. Após o recebimento, as previsões meteorológicas são interpoladas bilinearmente pelo laboratório para os pontos correspondentes às latitudes e longitudes de uma ampla rede de estações de monitoramento de superfície na América do Sul, que incluem estações operacionais do METAR (informações de superfície baseadas em observações realizadas em aeroportos), SYNOP da América do Sul, PCDs (estações automáticas operadas pelo INMET e IGAM) e boias do projeto PIRATA localizadas no Oceano Atlântico (Moreira et al. 2006), mostradas na Figura 44.

A Figura 45 apresenta a localização das estações onde são disponibilizadas previsões meteorológicas na região da bacia do rio Paraopeba. A interpolação dos dados da grade dos modelos para o local das estações de monitoramento tem dois objetivos principais nas operações do Laboratório MASTER: permitir a comparação entre o desempenho dos modelos com base nos dados de superfície observados e a composição da previsão MSMES, apresentada mais à frente no item 6.2.7.1. Os produtos gerados pelo laboratório são disponibilizados aos usuários em área de acesso público no sítio da internet (<http://master.iag.usp.br/>).

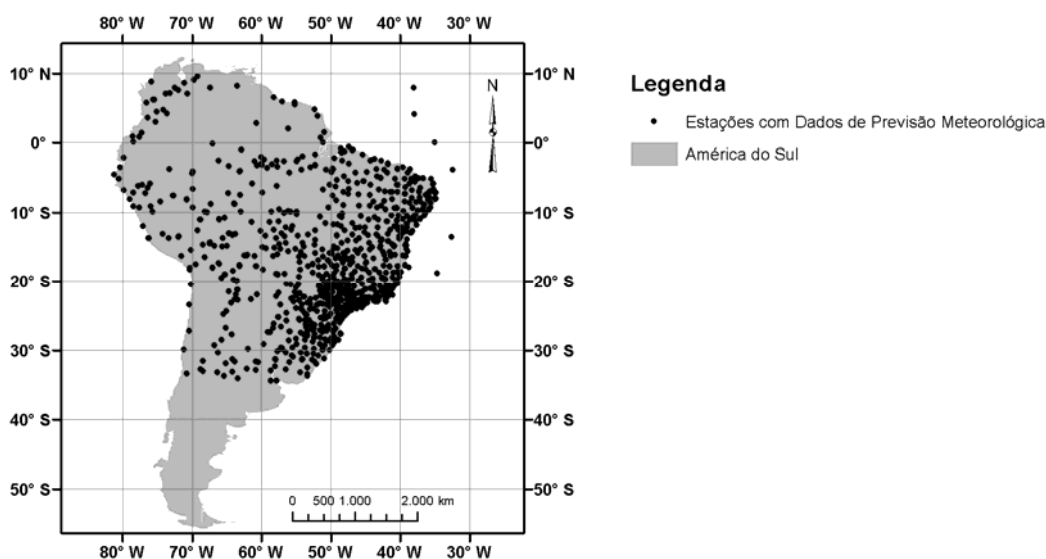


Figura 44. Localização das estações de superfície onde são disponibilizadas previsões meteorológicas pelo Laboratório MASTER.

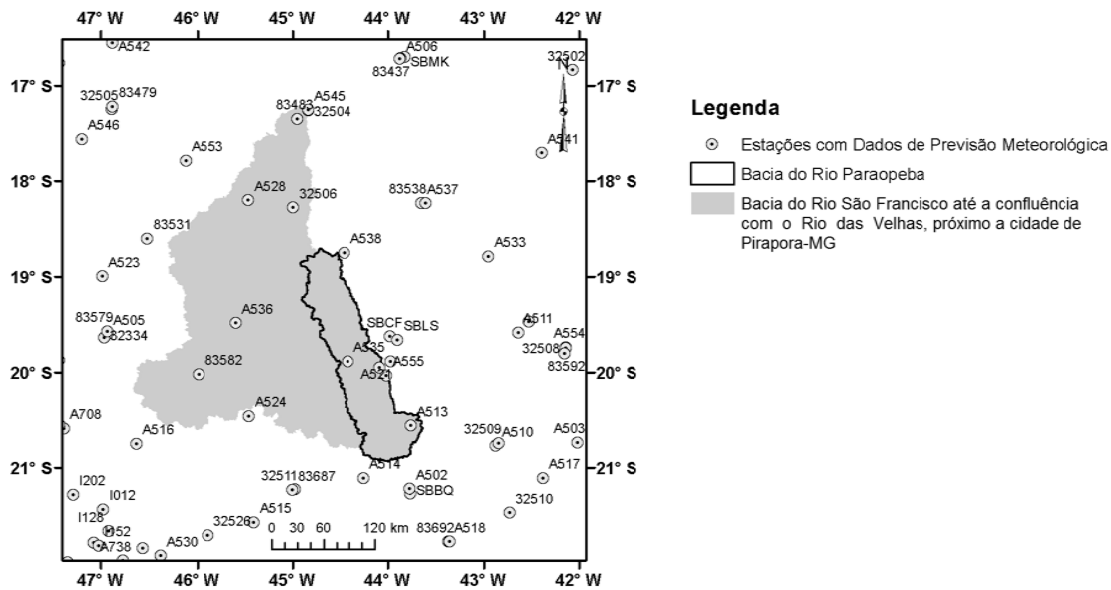


Figura 45. Localização das estações de superfície onde são disponibilizadas previsões meteorológicas na região próxima a bacia do rio Paraopeba.

Na geração das previsões de cheias foram utilizadas previsões precipitação de 38 modelos meteorológicos, disponibilizadas durante o período entre 2008 a 2011. As previsões utilizadas possuem frequência diária, discretização temporal de 6h sendo realizadas às 00:00 UTC. A Tabela 18, apresentada no Anexo 3, mostra algumas características dos modelos meteorológicos utilizados e os centros responsáveis pela emissão das previsões.

Uma característica importante com relação ao conjunto de previsões meteorológicas, comum a EPSs (*Ensemble Prediction Systems*) baseados na abordagem multi-modelo, como o MASTER, é que o número de membros do conjunto é variável entre previsões. A ausência de determinados membros em algumas previsões deve-se, tipicamente, a problemas de *software* ou *hardware* nos centros que produzem as previsões ou problemas durante o envio ou recebimento dessas informações respectivamente pelos centros emissor e receptor. A chance de ocorrência desse tipo de inconveniência aumenta com o tamanho e a diversidade do conjunto (Fraley & Raftery, 2010). A Figura 46 apresenta o número de membros disponíveis para as previsões realizadas às 00:00 UTC no período entre 2008 e 2011. Fica evidente nessa figura, uma menor disponibilidade do número de membros do conjunto até março de 2009. A partir desse mês, o número de membros do conjunto aumenta significativamente. O número máximo de membros do conjunto para uma previsão no período com disponibilidade de dados é igual a 36 e o número mínimo é de 2 membros.

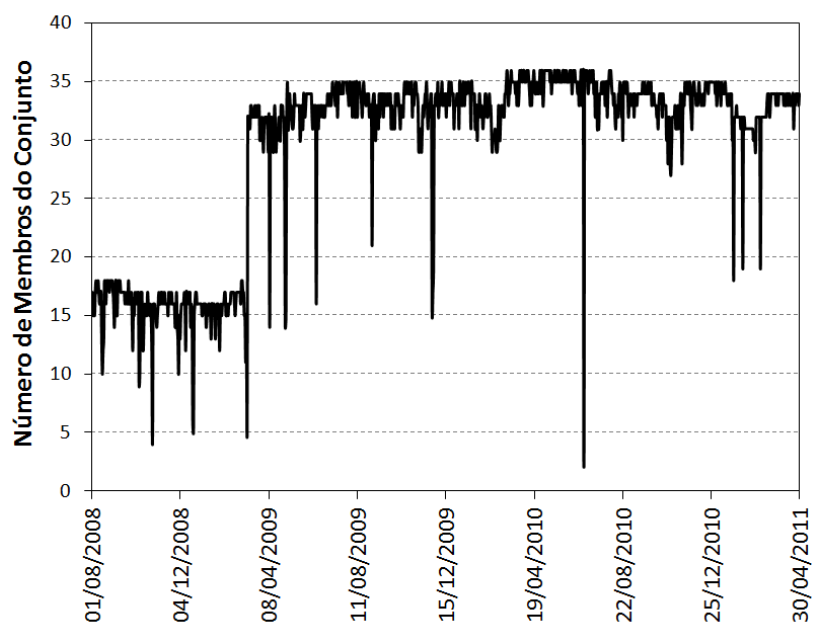


Figura 46. Número de membros do conjunto meteorológico para previsões realizadas às 00:00 UTC no período entre 2008-2011.

A Figura 47 apresenta a distribuição do número de membros do conjunto em relação ao número total de eventos de previsão nos períodos chuvosos (01/out a 31/abr) de cada um dos anos hidrológicos entre 2008 e 2011. Pode-se observar que aproximadamente 70% das previsões possuem entre 31 e 36 membros. Nesses períodos, considerados nas previsões hidrológicas, o número máximo e mínimo de membros do conjunto para uma previsão é de, respectivamente, 36 e 4 membros.

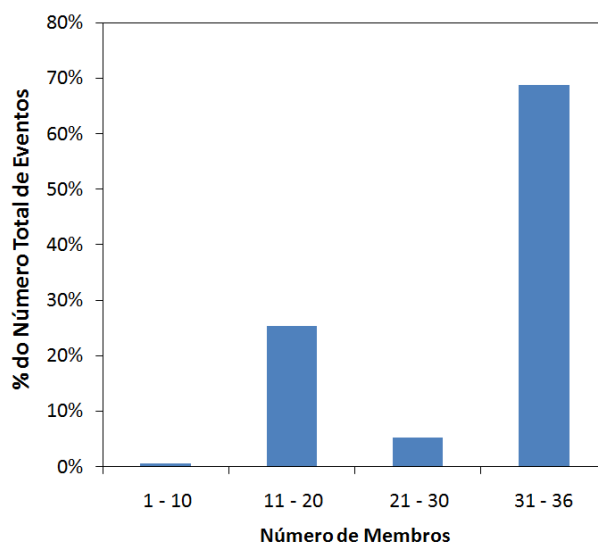


Figura 47. Distribuição do número de membros do conjunto em função do número de eventos utilizados nas previsões de cheia.

6.2.7.1 A previsão MSMES

O produto MSMES é uma previsão determinística baseada no conceito *multimodel super ensemble* (Krishnamurti, 1999), onde os membros do conjunto meteorológico são combinados estatisticamente em uma única previsão, levando em conta seus desempenhos em um período de tempo anterior à previsão. O objetivo desse tipo de técnica é obter uma previsão determinística com desempenho superior ao da média aritmética do conjunto ou qualquer um de seus membros. A metodologia utilizada pelo Laboratório MASTER consiste em atribuir diferentes pesos a cada um dos membros do conjunto na composição, de acordo com seu desempenho em um período de 15 dias anterior à previsão. O desempenho dos modelos é avaliado nos locais de estações de monitoramento de superfície através das medidas de desempenho viés médio (*viesM*) e o erro médio quadrático com subtração prévia do viés médio (*emqMV*), cujas formulações são apresentada nas Equações 23 e 24. Considerando uma única previsão por dia, o cálculo da previsão MSMES se dá de acordo com a Equação 25. A previsão MSMES é calculada de maneira independente para cada uma das variáveis meteorológicas consideradas e para cada estação de monitoramento de superfície.

$$viesM(L_m) = \frac{\sum_{i=1}^{Pt} (previsto(p, L_m) - observado(p, L_m))}{Pt} \quad (23)$$

$$emqMV(L_m) = \frac{\sum_{i=1}^{Pt} (previsto(p, L_m) - observado(p, L_m) - viesM(L_m))^2}{Pt} \quad (24)$$

$$MSMES(L) = \frac{\sum_{m=1}^{nm} \left(\frac{previsto(L_m) - viesM(L_m)}{emqMV(H_m)} \right)}{\sum_{m=1}^{tm} \left(\frac{1}{emqMV(L_m)} \right)} \quad (25)$$

onde *previsto* é a variável prevista; *observado* é variável observada; *m* é o modelo meteorológico considerado; *nm* é o número total de modelos; *i* representa cada um dos 15 dias anteriores de previsões; *Pt* é a extensão do período utilizada para avaliação do desempenho dos modelos (igual a 15 dias) e *L* é a antecedência da previsão.

Moreira et al. (2006), apresentaram uma avaliação do desempenho das previsões de alguns modelos PNT, incluindo a previsão MSMES, durante o mês de agosto de 2006. As previsões possuem horizonte de 168h e as variáveis previstas avaliadas foram vento zonal (m/s), temperatura do ar (K), pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa) e precipitação (mm). Os autores obtiveram que a previsão MSMES apresenta melhor desempenho que qualquer outro modelo avaliado para as variáveis temperatura, pressão e vento zonal. No caso da precipitação, no entanto, a previsão

MSMES não apresentou o melhor resultado, embora tenha sido superior a boa parte dos modelos avaliados. Segundo os autores, a precipitação observada utilizada na avaliação, obtida via satélite, não é bem estimada e apresenta grande variabilidade espaço-temporal, o que pode ter influenciado no resultado obtido.

Ao longo do texto dessa pesquisa, a previsão meteorológica MSMES da variável precipitação é referenciada pela sigla MSMES-M. A previsão hidrológica determinística resultante do uso da previsão MSMES-M, por sua vez, é denominada de MSMES-H.

Capítulo 7

Aplicação da Metodologia e Resultados

7.1 Modelagem hidrológica

7.1.1 Discretização da bacia

7.1.1.1 Trechos de rios, minibacias e sub-bacias

A primeira operação na discretização da bacia foi a imposição forçada da hidrografia vetorial do rio Paraopeba ao MDE (*stream burning*). Desta forma ajustou-se a rede gerada a partir da informação digital de elevação, assumindo a hidrografia vetorial utilizada como sendo confiável. A partir do MDE condicionado, foram definidos os trechos de rio e as minibacias do modelo hidrológico para a bacia do rio Paraopeba.

A Figura 48 apresenta o resultado final da definição da rede de drenagem e da discretização da bacia em minibacias. O limite mínimo de área de drenagem utilizado, que caracteriza o início da formação de cursos d'água, foi de 162km². Resultaram dessa operação 53 trechos de rio e 55 minibacias. A Tabela 6 mostra a distribuição de áreas em função do número de minibacias. As minibacias possuem áreas entre 0,55km² e 692,57km², sendo a faixa mais frequente de áreas entre 100,1 e 250km². As sub-bacias do modelo, foram definidas a partir da localização das estações fluviométricas Ponte Nova do Paraopeba e Porto do Mesquita. A Figura 49 apresenta a localização das estações fluviométricas e as áreas acumuladas das sub-bacias.

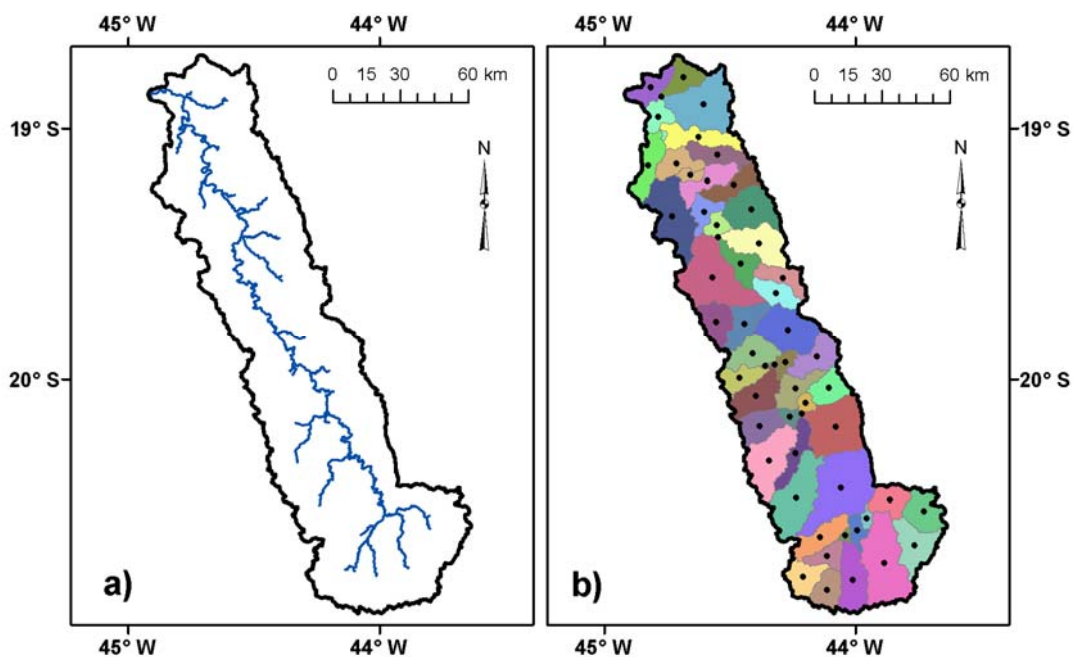


Figura 48. a) Rede de drenagem da bacia do rio Paraopeba. b) Discretização da bacia em minibacias. Os pontos na cor preta em (b) representam os centróides das minibacias.

Tabela 6. Distribuição das áreas das minibacias do modelo hidrológico para a bacia do rio Paraopeba.

Intervalo de áreas (km ²)	Número de minibacias	% do total de minibacias
0 - 1	3	5,45%
1,1 - 50	5	9,09%
50,1 - 100	5	9,09%
100,1 - 250	27	49,09%
250,1 - 500	10	18,18%
>500	5	9,09%
Total	55	100,00%

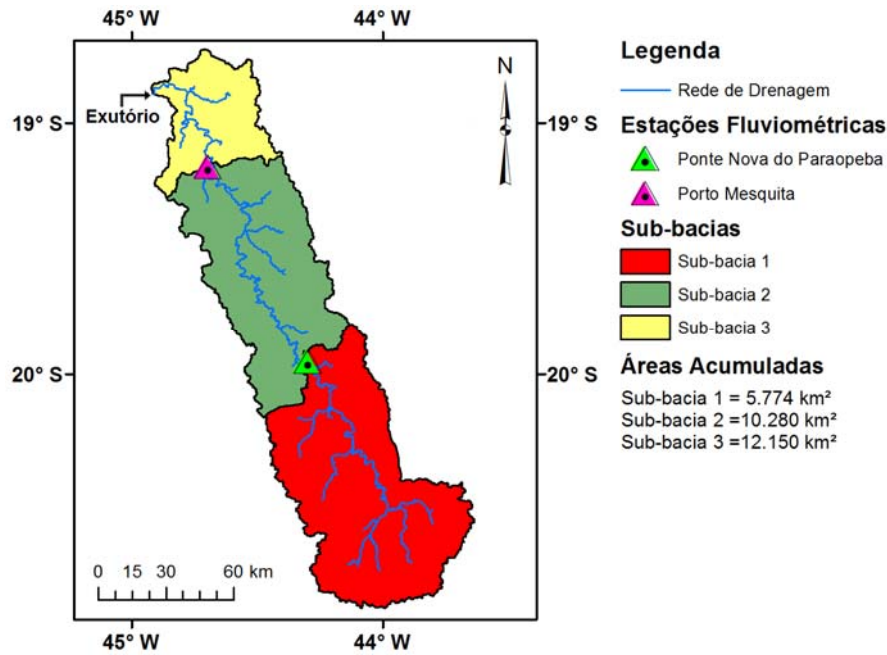


Figura 49. Discretização da bacia do rio Paraopeba em sub-bacias.

7.1.2 Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica

O mapa de URHs foi obtido através da sobreposição das bases de uso e tipo de solo previamente reclassificadas, procedimento ilustrado na Figura 50. Nessa operação, combinações consideradas inconsistentes derivadas do cruzamento de tipos de uso ou vegetação com certos tipos de solo, como, por exemplo, agricultura ou florestas em Litossolos, foram consideradas como áreas semi-impermeáveis. O mapa final de URHs para a bacia, apresentado na Figura 51, é composto por oito classes: 1) Agricultura em solo profundo; 2) Campos, Cerrado e Caatinga em solo profundo; 3) Floresta em solo profundo; 4) Agricultura em solo médio; 5) Campos, Cerrado e Caatinga em solo médio; 6) Florestas em solo médio; 7) Áreas Semi-impermeáveis e; 8) Corpos d'água. A Tabela 7 apresenta a fração da área total da bacia ocupada por cada URH.

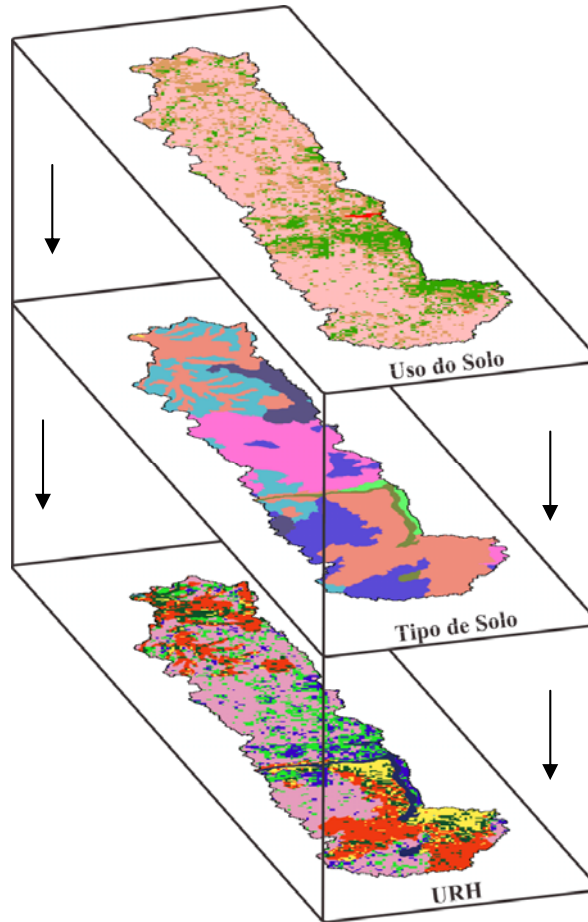


Figura 50. Ilustração do procedimento para composição do mapa de URHs.

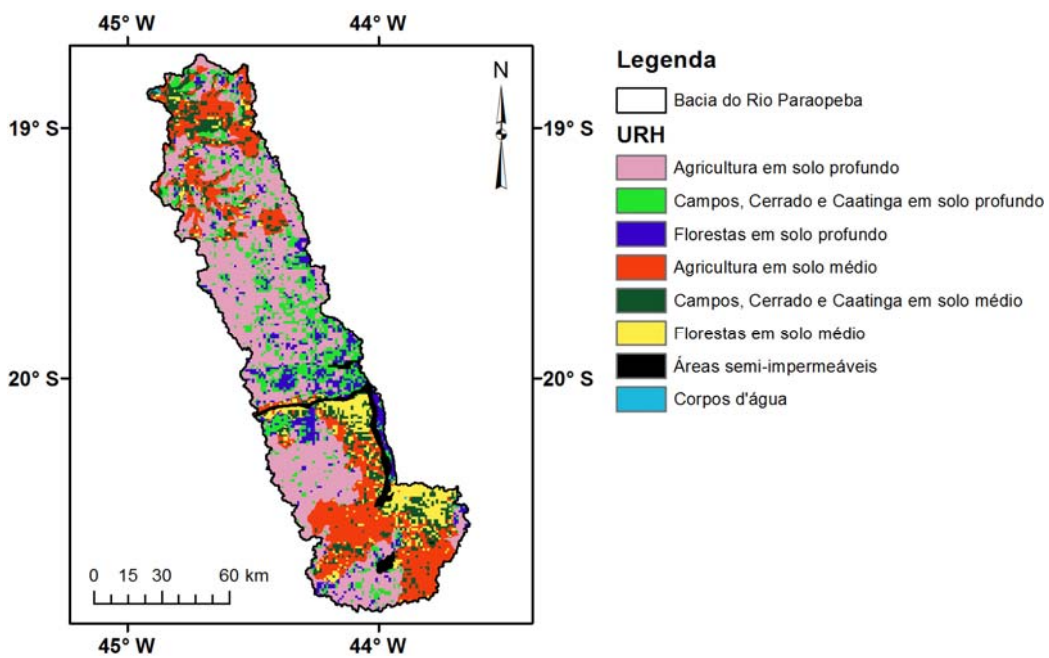


Figura 51. Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para a bacia do rio Paraopeba.

Tabela 7. Fração das URHs sobre a área total da bacia do rio Paraopeba.

Unidades de Resposta Hidrológica	% da Área Total
Agricultura em solo profundo	39,5%
Campos, Cerrado e Caatinga em solo profundo	13,6%
Floresta em solo profundo	8,1%
Agricultura em solo médio	20,0%
Campos, Cerrado e Caatinga em solo médio	9,0%
Florestas em solo médio	7,0%
Áreas Semi-impermeáveis	2,7%
Corpos d'água	0,1%

7.1.3 Validação dos dados hidrológicos

A validação dos dados hidrológicos no trabalho foi realizada em duas etapas. Primeiramente foi realizada uma avaliação visual das séries horárias de vazão e precipitação utilizadas, procurando identificar erros grosseiros. Num segundo momento os dados horários foram comparados com as informações disponíveis em nível diário, obtidos do banco de dados da ANA.

Para as séries horárias de precipitação, não foram identificados em uma primeira análise valores considerados ineficazes. Em uma simulação hidrológica preliminar, o hidrograma calculado mostrou coerência na representação dos períodos de cheia e estiagem, apresentando vazões na mesma ordem de grandeza dos dados observados. Os dados de precipitação acumulados em nível anual mostraram ainda coerência com relação aos gradientes observados entre as porções superior e inferior da bacia.

Na comparação com as séries de dados diários obtidos da rede convencional, utilizou-se a precipitação média sobre a porção da bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita em nível diário e mensal. No período entre ago/2000 e abr/11 os dados mostraram boa concordância em nível diário, com coeficiente de correlação igual a 0,93, como mostra o diagrama de dispersão na Figura 52. Em nível mensal as séries de dados observados em nível diário mostraram uma diferença média de 15%, observando-se uma subestimativa dos dados obtidos via rede telemétrica em relação à rede convencional (Figura 53).

Na avaliação da série de vazões horárias, observaram-se alguns períodos com oscilações bruscas entre intervalos de tempo, não justificadas pela ocorrência de precipitação na bacia. Uma das hipóteses são problemas na operação dos sensores automáticos de medição. Nessa análise foram descartados manualmente cerca de 5% dos intervalos de tempo com dados de vazão disponíveis para a estação Ponte Nova do Paraopeba, e cerca de 0,1% dos intervalos de tempos da série da estação Porto do Mesquita.

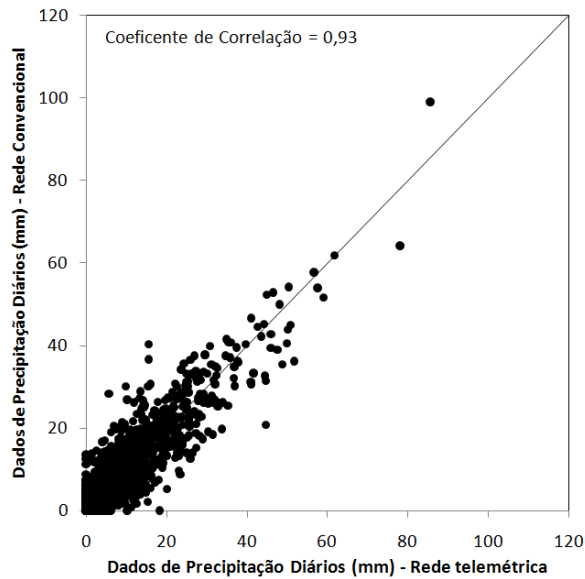


Figura 52. Diagrama de dispersão dos dados médios diários de precipitação integrada sobre a porção da bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita: rede telemétrica versus rede convencional.

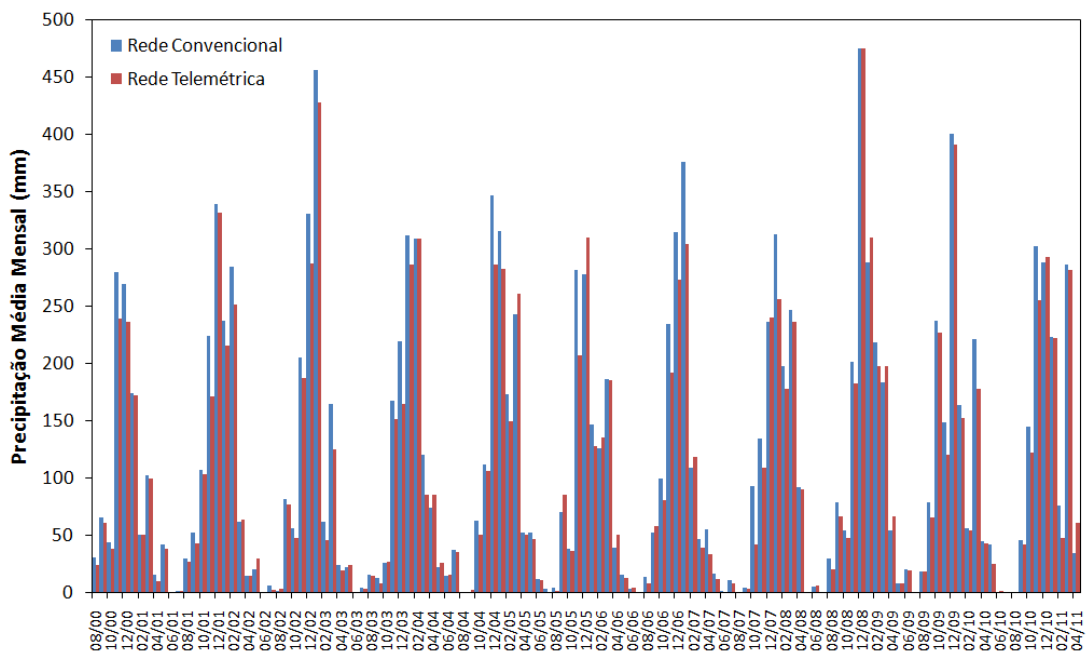


Figura 53. Precipitação mensal integrada sobre a bacia do rio Paraopeba definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita obtida através da rede convencional e da rede telemétrica.

No caso da estação Ponte Nova do Paraopeba, a série de vazões horárias foi ainda comparada com a série diária da estação convencional, que possui dados disponíveis no período entre 2000 e 2011. Observaram-se duas situações distintas. No período que se estende entre jun/2000 e set/2006, observou-se uma superestimativa sistemática dos dados diários obtidos via

rede telemétrica em relação aos dados da rede convencional, embora o comportamento dos hidrogramas na ascensão e recessão das cheias tenha se mostrado semelhante entre as séries. A Figura 54 apresenta as séries de vazões médias diárias no período mencionado. Nessa figura, foram suprimidos todos os intervalos de tempo em que não há disponibilidade simultânea de dados obtidos via rede telemétrica e convencional, para melhor visualização. A Figura 55 apresenta o diagrama de dispersão entre as séries de vazões para o período mencionado. Os dados posicionados abaixo da linha de 45° indicam uma superestimativa dos dados registrados pela rede telemétrica em relação aos observados via rede convencional.

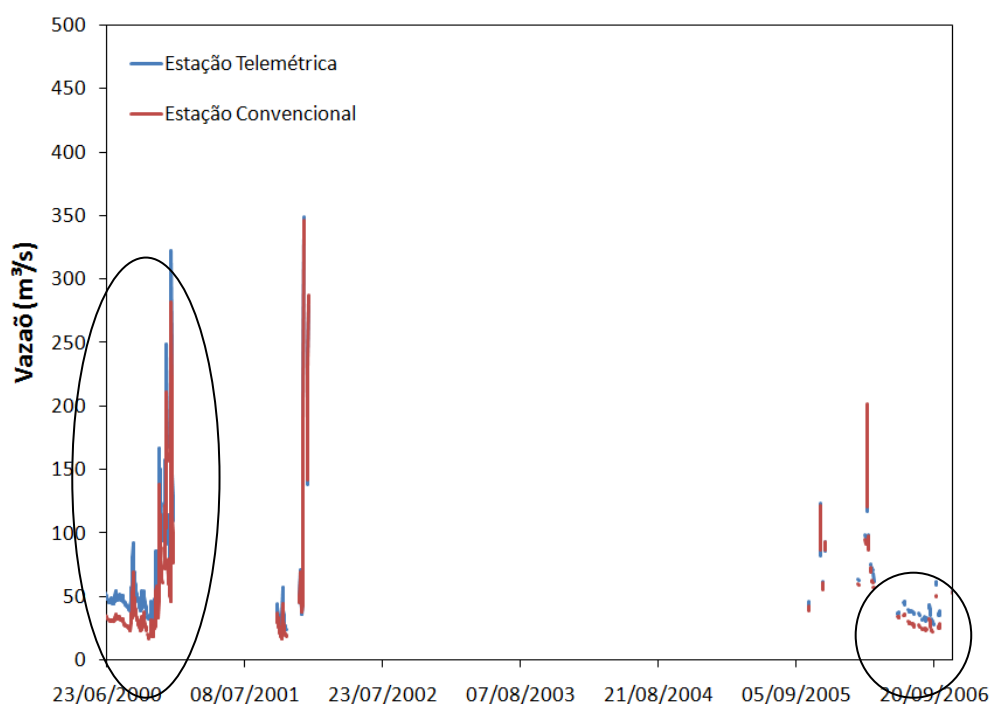


Figura 54. Comparação entre as séries de vazão diárias obtidas pela rede convencional e através da rede telemétrica na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre jun/2000 a set/2006.

No restante da série, entre out/2006 e jun/2011, as séries de vazão diárias obtidas via rede telemétrica e convencional mostraram uma concordância bastante boa, tanto nos períodos de estiagem como durante as cheias, como se pode observar na Figura 56 e na Figura 57, que apresentam, respectivamente, os hidrogramas e o diagrama de dispersão. A concentração dos pares do gráfico próximo à linha de 45° na Figura 57 indica boa concordância entre as séries de dados.

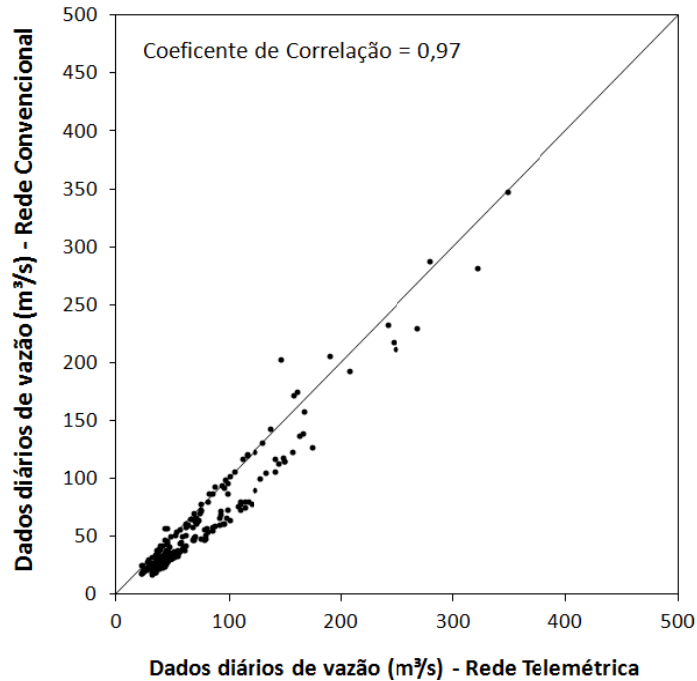


Figura 55. Diagrama de dispersão entre as séries de vazão diárias obtidas através da rede convencional e telemétrica na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre jun/2000 a set/2006.

Por fim, embora tenham sido observadas discrepâncias nos dados de vazão coletados via rede telemétrica e pela rede convencional na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre 2000-2006, optou-se por não descartar essas informações, já que esse período compreende a etapa de validação do modelo.

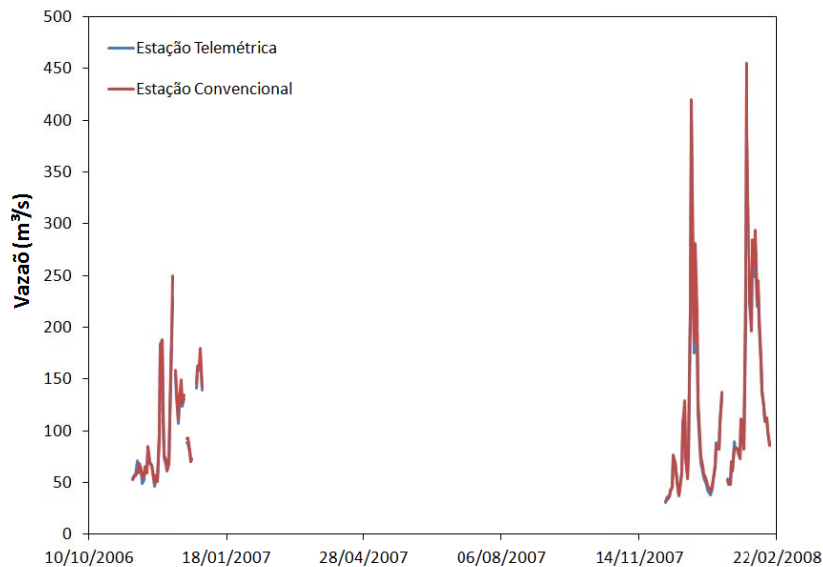


Figura 56. Comparação entre as séries de vazão diárias obtidas pela rede convencional e através da rede telemétrica na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre out/2006 a jun/2011.

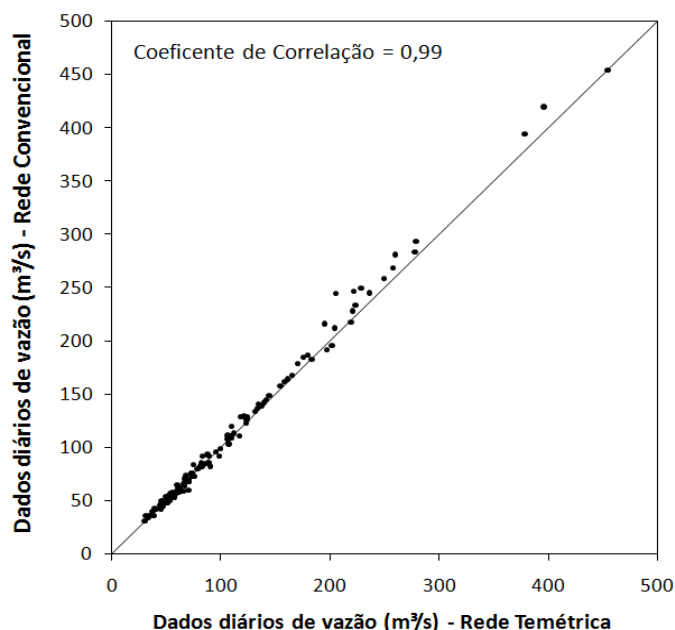


Figura 57. Diagrama de dispersão entre as séries de vazão diárias obtidas através da rede convencional e telemétrica na estação Ponte Nova do Paraopeba no período entre out/2006 a jun/2011.

7.1.4 Calibração e verificação do modelo hidrológico

Na execução dos procedimentos de calibração e verificação do modelo, as séries de dados horários disponíveis foram divididas em dois períodos. O primeiro período, de 19/06/2000 00:00 UTC a 30/11/2006 23:00 UTC, representando cerca de 60% da série de dados, foi utilizado na validação do modelo. O segundo período, de 01/12/2006 00:00 UTC a 20/06/2011 23:00 UTC, representando 40% da série, foi utilizado na calibração do modelo. O período de calibração do modelo foi definido em função da disponibilidade de dados tanto nas estações pluviométricas como fluviométricas, que apresentam menor número de falhas a partir do final do ano de 2006. O intervalo de tempo adotado na simulação foi de uma hora.

Os parâmetros fixos, relacionados à vegetação como albedo, resistência superficial, altura da vegetação e índice de área foliar, foram arbitrados com base em valores disponíveis na literatura. Os valores adotados encontram-se no Anexo 4.

Os parâmetros sensíveis do modelo MGB-IPH foram ajustados de modo a obter uma boa concordância entre as vazões observadas e calculadas nas duas estações fluviométricas que definem as Sub-bacias 1 e 2. Dois tipos de técnicas foram usadas: (1) calibração manual, por tentativa e erro e, (2) calibração automática multi-objetivo utilizando o algoritmo MOCOM-UA (Yapo et al., 1998). Inicialmente, os parâmetros do modelo foram alterados manualmente, observando-se tanto os hidrogramas calculados e observados como os valores das medidas de desempenho. Nessa etapa, optou-se por uma simplificação, adotando grupos de parâmetros iguais para classes de URH com

mesma profundidade de solo. Posteriormente, os conjuntos de parâmetros foram submetidos à calibração automática, onde foram definidos intervalos de variação a partir das estimativas iniciais obtidas na calibração manual. As funções objetivo utilizadas na calibração foram o Coeficiente de Nash-Sutcliffe, o Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões e o erro percentual de volume. Essas três funções foram também utilizadas como medida de desempenho no período de validação. Os resultados da calibração e validação do modelo, em termos das medidas de desempenho, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados da calibração e validação do modelo MGB-IPH na bacia do rio Paraopeba.

Estação Fluviométrica	Sub-bacia	Área de Drenagem (km ²)	Calibração				Validação			
			NS	NS*	NSlog	ΔV (%)	NS	NS*	NSlog	ΔV (%)
Ponte Nova do Paraopeba	1	5.774	0,78	0,76	0,89	-6,63	0,76	0,73	0,72	-11,54
Porto do Mesquita	2	10.280	0,81	0,78	0,93	-3,31	0,89	0,87	0,90	3,05

* considerando somente os períodos chuvosos (01/out a 31/abr).

A Figura 58 e a Figura 59, apresentam, respectivamente, os hidrogramas resultantes da calibração nas estações fluviométricas Ponte Nova do Paraopeba (Sub-bacia 1) e Porto do Mesquita (Sub-bacia 2). Na Figura 58 fica evidente a limitada disponibilidade de dados da estação Ponte Nova do Paraopeba, o que não assegura a representatividade do conjunto de parâmetros para a porção superior da bacia, embora os resultados em termos das medidas de desempenho na calibração tenham sido razoáveis.

Os ajustes obtidos na calibração do modelo na estação Porto do Mesquita foram considerados satisfatórios. Grande parte das vazões de pico foi bem representada, embora alguns eventos não tenham sido detectados pelo modelo. Observou-se ainda, para alguns eventos, a ocorrência de defasagem importante no tempo entre as vazões observadas e calculadas, como mostrado no maior evento da série de dados, em destaque na Figura 59. Entre os possíveis fatores associados a essa questão, podem ser citados: (a) representação espacial deficiente do campo de chuva na bacia, devido à baixa densidade de postos pluviométricos dentro dos limites da bacia; e (b) possíveis efeitos de reservatórios ou da planície de inundação na propagação do escoamento, desconsiderados na aplicação do modelo. Apesar do foco do trabalho ter sido as cheias, a estiagem foi bem representada pelo modelo no período de calibração. Nesse período observou-se, de modo geral, uma subestimativa das vazões calculadas em ambas as estações.

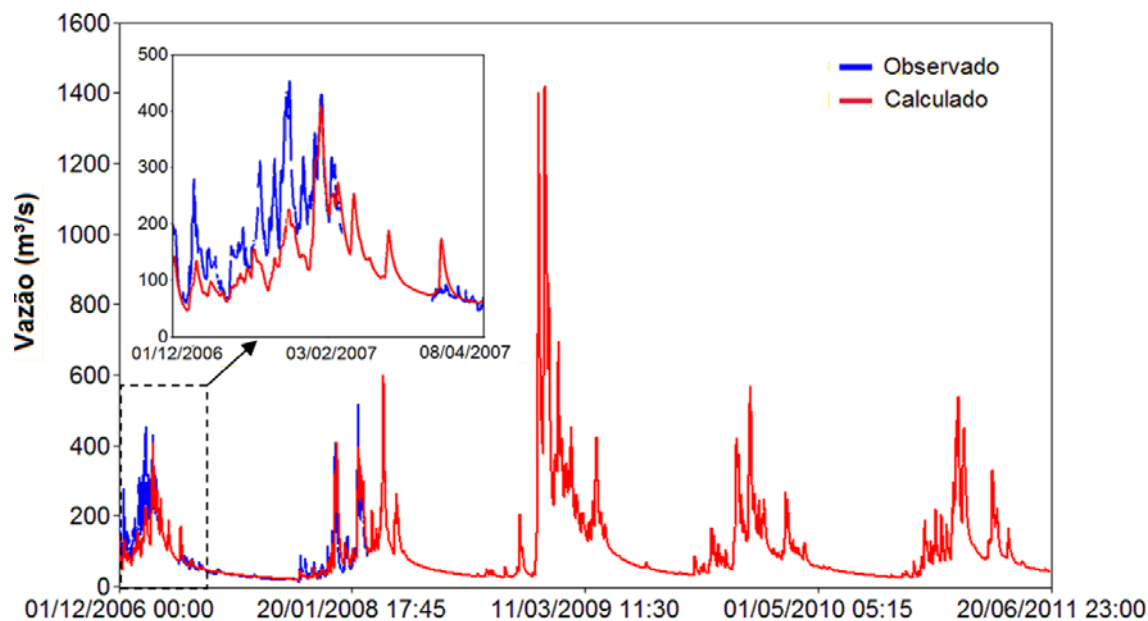


Figura 58. Hidrogramas observado e calculado no posto Ponte Nova do Paraopeba (Sub-bacia 1), no período de calibração do modelo (01/12/2006 00:00 UTC a 20/06/2011 23:00 UTC). Em detalhe aparecem alguns eventos ocorridos no ano hidrológico 2006-2007.

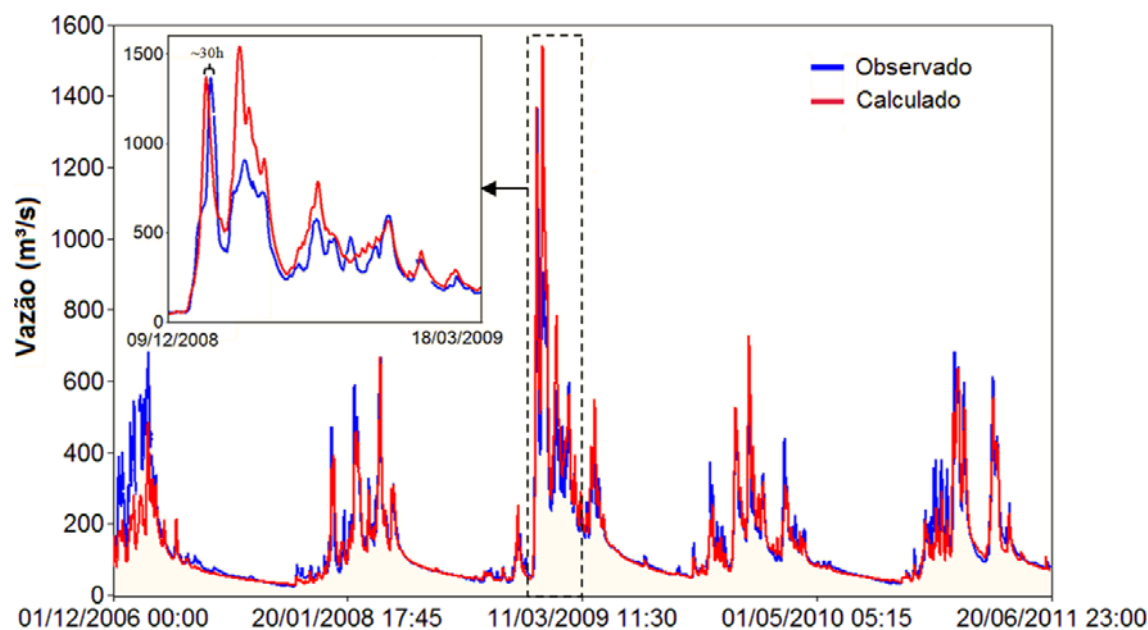


Figura 59. Hidrogramas observado e calculado no posto Porto do Mesquita (Sub-bacia 2), no período de calibração do modelo (01/12/2006 00:00 UTC a 20/06/2011 23:00 UTC). Em detalhe aparece o maior evento ocorrido no período, no final do ano de 2008.

Na validação do modelo, os resultados obtidos para estação fluviométrica Ponte Nova do Paraopeba, mostrado na Figura 60, foram novamente razoáveis, observando-se uma ligeira diminuição do desempenho do modelo em relação ao período de calibração, especialmente em termos do erro de volume. O aumento de erro de volume pode, no entanto, estar relacionado a problemas nos dados da rede telemétrica nessa estação, que mostrou uma superestimativa

sistemática em relação aos dados da rede convencional, como previamente comentado. O resultado obtido na validação para a estação Porto do Mesquita (Figura 61), por outro lado, mostra desempenho superior mesmo ao obtido no período de calibração do modelo. No período de validação, o modelo mostrou uma tendência de superestimativa das vazões na estação Porto do Mesquita e de subestimativa na estação Ponte Nova do Paraopeba, como mostram as estatísticas apresentadas na Tabela 8.

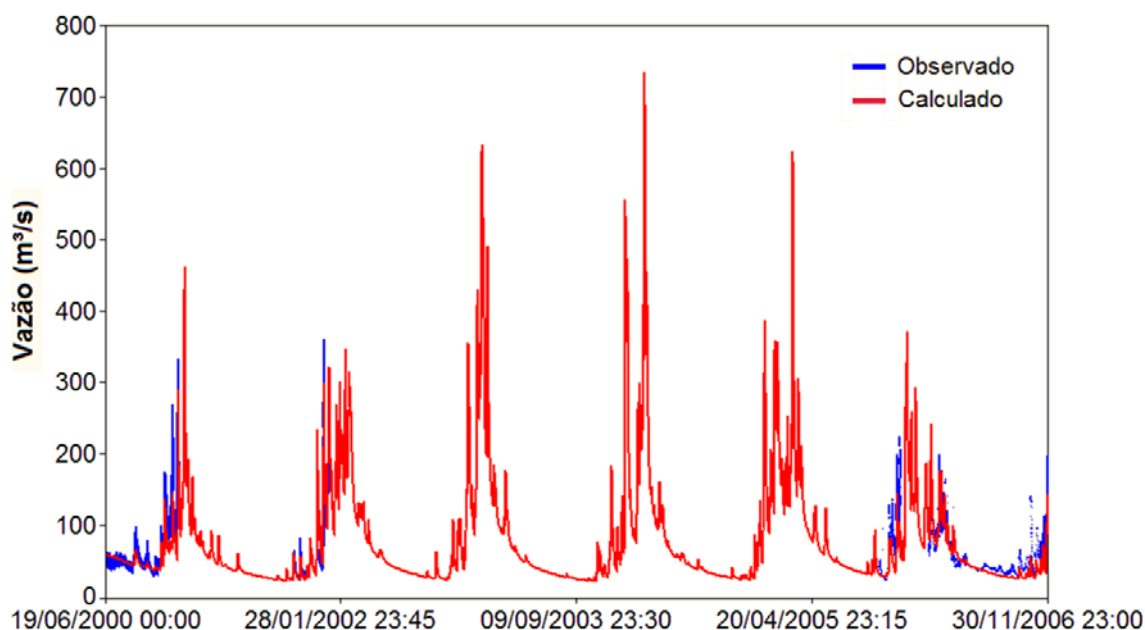


Figura 60. Hidrogramas observado e calculado no posto Ponte Nova do Paraopeba (Sub-bacia 1), no período de validação do modelo (19/06/2000 00:00 UTC a 30/11/2006 23:00 UTC).

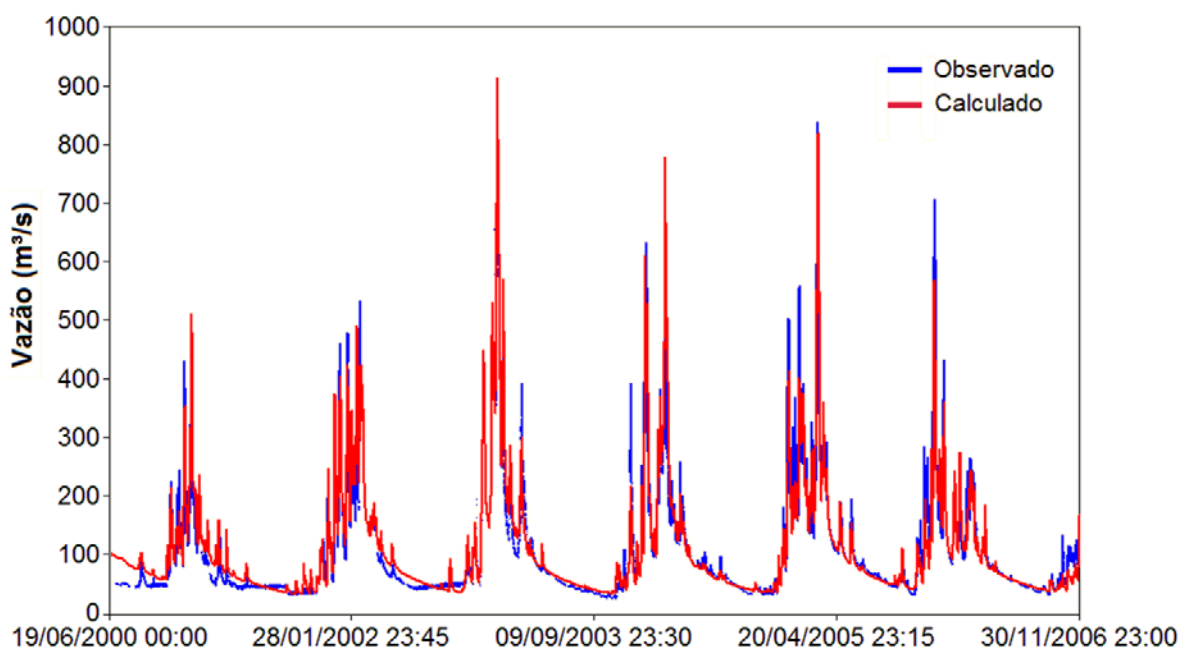


Figura 61. Hidrogramas observado e calculado no posto Porto do Mesquita (Sub-bacia 2), no período de validação do modelo (19/06/2000 00:00 UTC a 30/11/2006 23:00 UTC).

7.2 Previsão de cheias

Nesse capítulo são apresentados os resultados das previsões de cheia por conjunto e atividades relacionadas, divididos em quatro itens principais:

1. Assimilação de dados;
2. Previsão de precipitação;
3. Previsão de cheias por conjunto;
4. Análise do impacto da redução do número de membros do conjunto.

Um aspecto comum a todas as análises empreendidas nos quatro itens supracitados refere-se à porção da bacia do rio Paraopeba utilizada, definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita, mostrada na Figura 62.

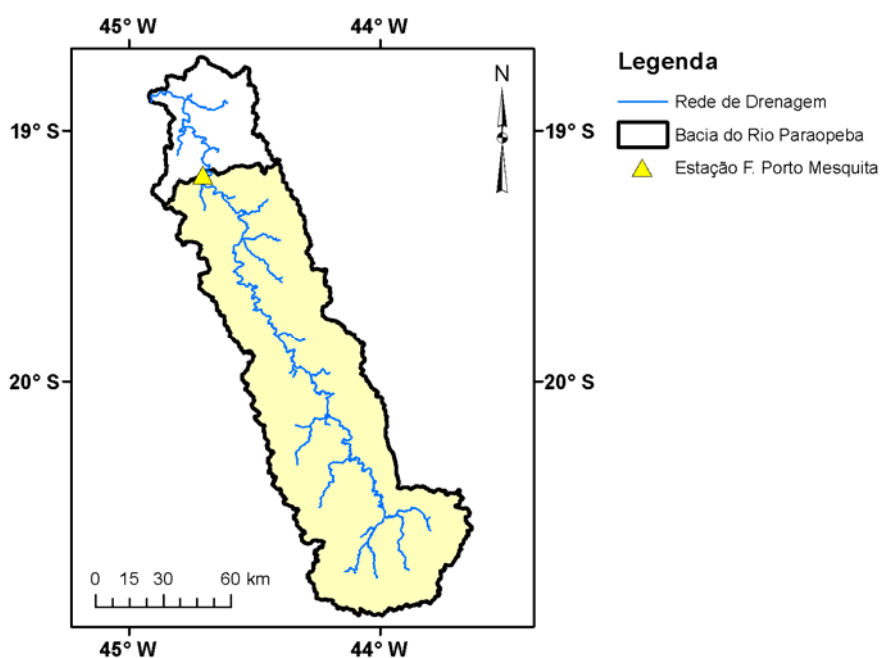


Figura 62. Porção da bacia do rio Paraopeba definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita.

7.2.1 Assimilação de dados

Na análise do método de assimilação de dados do modelo, foram realizadas sucessivas previsões de vazão com chuva perfeita no posto Porto do Mesquita com intervalo de tempo horário, frequência de emissão de 6h e horizonte de previsão de 72h. O período selecionado para as previsões foi de 10/10/2003 00:00 UTC a 01/06/2011 00:00 UTC, que possui razoável disponibilidade de dados na estação utilizada na análise.

Ao todo foram avaliadas trinta e oito diferentes configurações de parâmetros do método de assimilação, com objetivo de determinar a melhor configuração dentre os conjuntos. Na composição das diferentes configurações dos parâmetros do método de assimilação *ebac*, *bx* e *Pblim* tiveram sua faixa de variação limitada de acordo com os valores apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Limites mínimos e máximos adotados na definição das diferentes configurações de parâmetros avaliadas.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
<i>ebac</i>	0	2,5
<i>bx</i>	0,2	1
<i>Pblim</i>	0,1	0,3

Na aplicação do método de assimilação de dados, as variáveis de estado do modelo em todas as minibacias à montante da estação Porto do Mesquita foram atualizadas com base nos dados de vazão observados nessa estação. Devido ao grande número de falhas na série de dados de vazão observada na estação Ponte Nova do Paraopeba, essa estação de monitoramento foi descartada na aplicação do método de assimilação de dados. A Figura 63 mostra a relação A_i/A_s utilizada na aplicação do método de assimilação. Na figura pode-se observar que para minibacias mais próximas ao ponto de assimilação de dados (triângulo em amarelo) e que se situam sobre a rede de drenagem principal (maior área de drenagem acumulada) é dado maior peso na atualização das vazões na rede de drenagem. As vazões nos trechos de rios associados à minibacias de cabeceira ou mais distantes da estação Porto do Mesquita praticamente não são corrigidas.

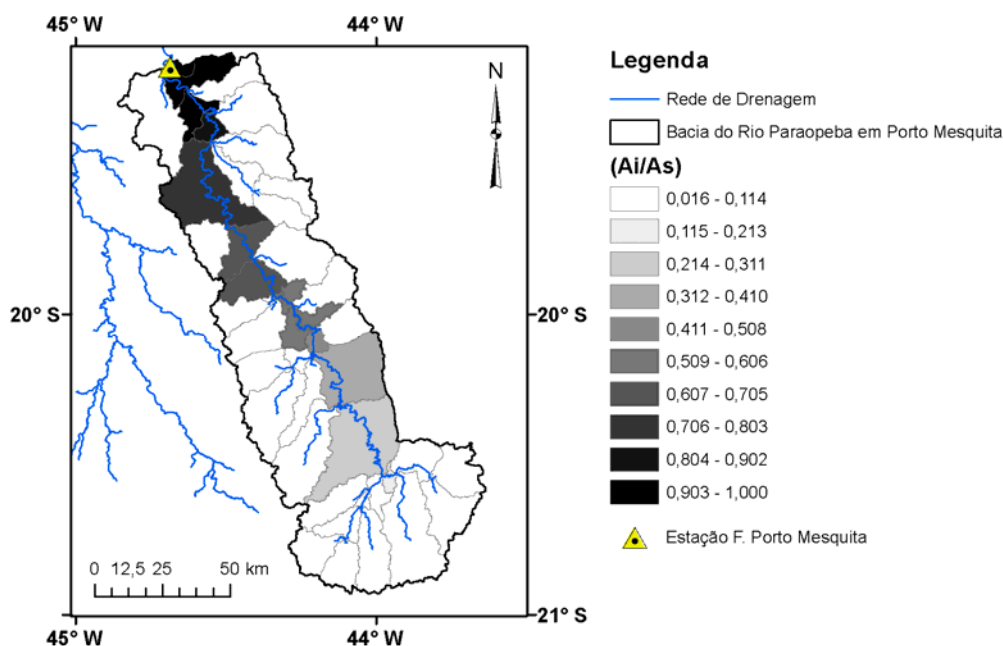


Figura 63. Relação (A_i/A_s) para a bacia do rio Paraopeba em Porto do Mesquita usada no método de assimilação de dados de vazão.

Como indicador da situação de cheias no posto de Porto do Mesquita foi utilizada a Q20% da curva de permanência, igual a 177,0 m³/s, que tem valor próximo a vazão média durante o período de cheias na bacia. Assim, se a vazão observada em alguma das antecedências da previsão superou esse valor, a previsão foi utilizada nas análises, caso contrário, foi descartada. Outra condição necessária para que fosse a previsão fosse considerada nas análises é a disponibilidade de dados de vazão observados para uso no método de assimilação no intervalo de realização da previsão.

Como medidas de desempenho para avaliação das previsões de cheia foram utilizados o Coeficiente de Nash Sutcliffe (NS), o Coeficiente de Persistência (CP), o Erro Médio (EM) e o Erro Médio Quadrático (EMQ). Para fins de comparação, foram ainda efetuadas previsões, para o mesmo período mencionado, em outros três cenários, que são:

- previsão com chuva zero;
- previsão sem assimilação de dados;
- previsão com base na persistência.

Ao todo, foram realizadas cerca de 425.000 previsões com o modelo MGB-IPH, nos diferentes cenários propostos, das quais cerca de 114.000 foram utilizadas para análise do método de assimilação. Os resultados obtidos nas previsões na estação Porto do Mesquita são apresentados na Figura 64. Nessa figura, na cor cinza são apresentados os resultados das previsões com chuva perfeita, utilizando as diferentes configurações de parâmetros do método de assimilação de dados de vazão. Em vermelho é apresentado o desempenho do modelo com a melhor configuração de parâmetros nesse mesmo cenário. Nas cores verde, laranja e azul são apresentados, respectivamente, os resultados dos cenários com chuva zero, sem assimilação de dados e com base na persistência, descritos anteriormente. A Tabela 10 apresenta as cinco configurações de parâmetros que apresentaram o melhor resultado nas previsões, dentre todas as 38 configurações de parâmetros avaliadas.

Tabela 10. Configurações de parâmetros do método de assimilação de dados que apresentaram os melhores resultados na previsão com chuva perfeita.

<i>Ranking</i>	<i>PBlim</i>	<i>ebac</i>	<i>bx</i>
1°	0,2	1,5	0,4
2°	0,1	1,5	0,5
3°	0,2	1,5	0,5
4°	0,1	0,5	0,3
5°	0,3	0,6	0,5

A Figura 64(a), apresenta os resultados das previsões em termos de NS. Pode-se observar, que, independentemente da configuração de parâmetros adotada para o método de assimilação, os resultados das previsões com chuva perfeita apresentam valores superiores a 0,80 para qualquer antecedência, mantendo valores maiores que 0,95 em antecedências de até 18 horas e se estabilizando em valores próximos a 0,85, a partir da sexagésima hora de previsão. A tendência de diminuição do desempenho do modelo de previsão ao longo do horizonte também é observada nas Figura 64(c) e Figura 64(d), que mostram que EM e EMQ aumentam com o aumento da antecedência. Os valores positivos de EM na maior parte das antecedências no cenário com chuva perfeita, observados na Figura 64(d), indicam uma superestimativa das previsões em relação às observações. Os valores negativos nos cenários com chuva zero e sem assimilação de dados nessa mesma figura indicam, por outro lado, uma subestimativa das previsões.

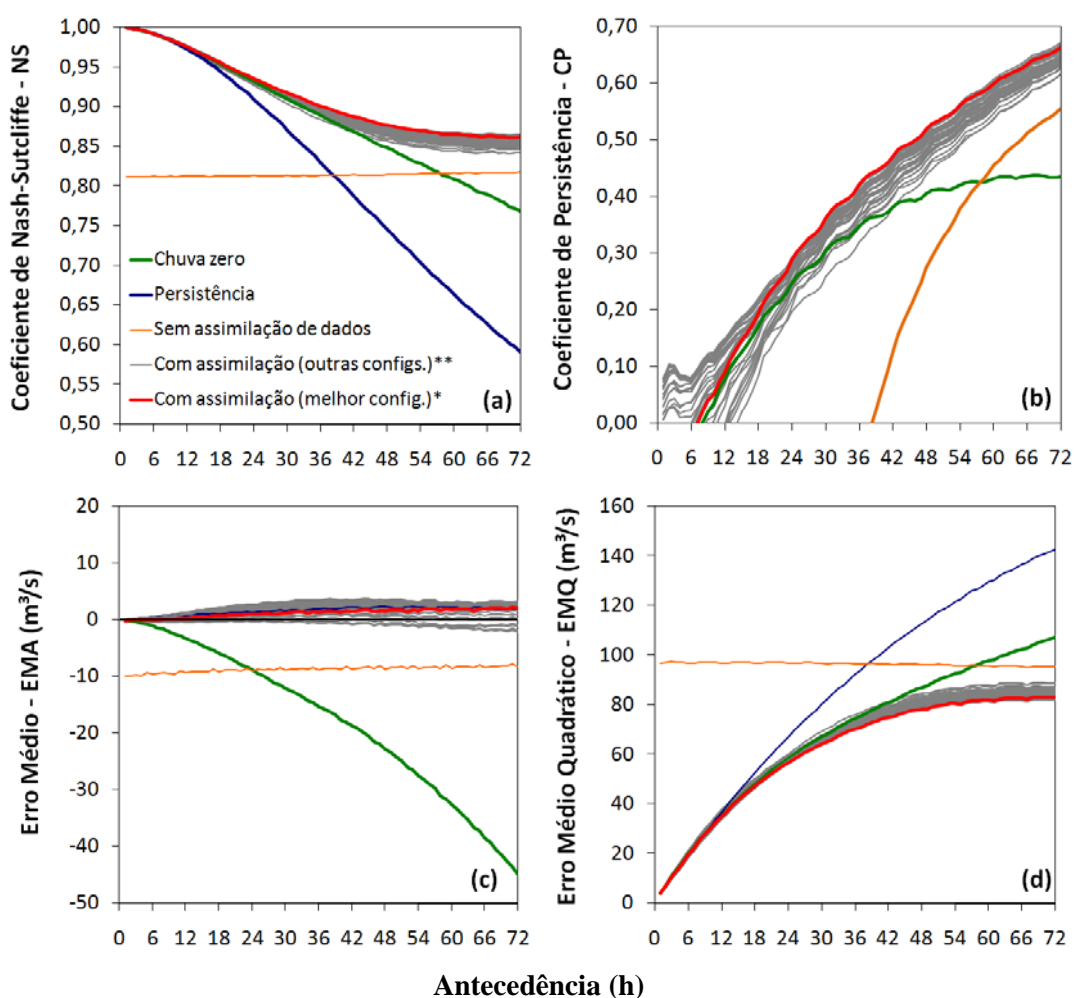


Figura 64. Resultados das previsões de cheia para o posto Porto do Mesquita: (a) Coeficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe; (b) Coeficiente de Persistência; (c) Erro médio e (d) Erro médio quadrático. *configuração de parâmetros do método de assimilação que apresentou o melhor resultado nas previsões. ** demais configurações de parâmetros.

Observa-se ainda na Figura 64(a), que os resultados das previsões em termos de NS em todos os cenários, com exceção do cenário sem assimilação de dados, possuem desempenho similares até cerca de 12 horas de antecedência, fato relacionado ao tempo de resposta da bacia. Após esse intervalo de tempo, os cenários de previsão com assimilação de dados apresentam melhora perceptível em relação ao demais.

Dos gráficos da Figura 64 conclui-se que o resultado da assimilação de dados, independente da configuração de parâmetros utilizada, tem impacto positivo em relação a realização das previsões sem o uso do método de assimilação. Em termos de Nash-Sutcliffe (Figura 64(a)), a melhora nos primeiros intervalos de tempo do horizonte de previsão é cerca de 20%, diminuindo para cerca de 5% para antecedências próximas às 72h.

Na Figura 64(b), se compara o resultado das previsões do modelo hidrológico com o resultado de um modelo hipotético que prevê para todos os intervalos de tempo até o horizonte da previsão, o último valor observado, através de CP. Nesse gráfico são suprimidos os valores negativos. Observa-se, que para algumas configurações de parâmetros já existe benefício em se utilizar a previsão hidrológica sobre a persistência desde o primeiro intervalo de tempo de previsão, mas esse benefício diminui para maiores antecedências. Para o conjunto de parâmetros que apresentou os melhores resultados nas análises, no entanto, não existe ganho evidente em se utilizar as previsões com o modelo chuva-vazão para antecedências inferiores a 8 horas. Após essa antecedência, a previsão com o melhor conjunto de parâmetros é melhor que qualquer outra, sobretudo no horizonte da previsão. A partir do décimo sexto intervalo de tempo de previsão, todos os cenários apresentam benefício em relação a utilizar o último valor observado como previsão.

A comparação entre os resultados das previsões nos cenários com chuva zero e com assimilação de dados demonstra o benefício que pode ser obtido com a incorporação de previsões de precipitação a partir de antecedências maiores que aproximadamente 8h. No caso do uso de previsões com chuva perfeita, o EMQ é reduzido em cerca de 35% em relação ao cenário com chuva zero na antecedência de 72h (Figura 64(d)).

O intervalo de tempo em que o desempenho do modelo no cenário sem assimilação de dados supera o desempenho do modelo no cenário com chuva zero, mostrado na Figura 64(a), Figura 64(b) e Figura 64(d), cerca de 58h, indica a antecedência em que as condições de contorno assumem maior importância que as condições iniciais na previsão. Esse resultado sugere que até a antecedência de 58h, a atualização das condições iniciais são mais importantes no desempenho das previsões que a própria condição de contorno, dada pela precipitação.

A Figura 65 apresenta o Diagrama de Dispersão entre as vazões calculadas e previstas para as antecedências de 12 e 72 horas utilizando a chuva perfeita e o melhor conjunto de parâmetros do

procedimento de assimilação. Pode-se observar que para uma antecedência de 12 horas os valores se concentram mais próximo da linha de 45° do gráfico, indicando que o erro cometido nas previsões é menor para antecedências iniciais, o que evidencia o efeito positivo do método de assimilação de dados nas previsões. A grande dispersão dos pares observação *versus* previsão para vazões maiores que cerca de 600m³/s, é resultado de previsões realizadas durante o maior evento observado na série de dados horários entre 2000-2011, ocorrido entre os meses de dezembro e janeiro do ano hidrológico 2008-2009.

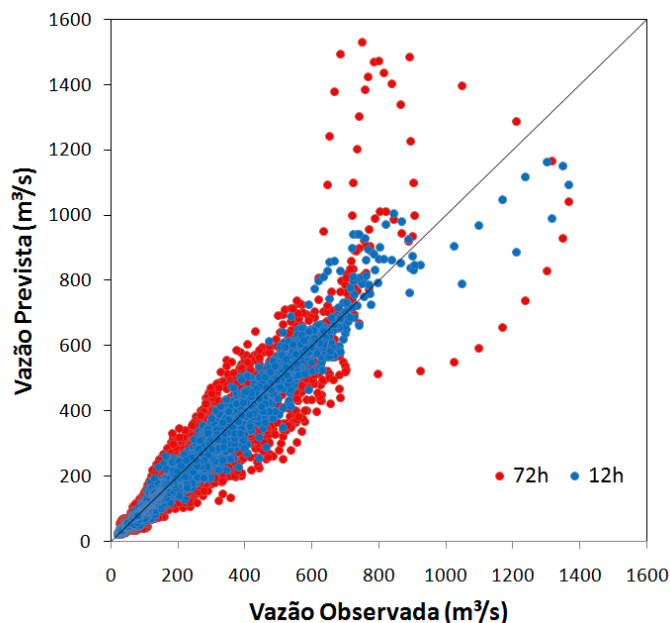


Figura 65. Vazões calculadas *versus* previstas para as antecedências de 12h e 72 horas, no cenário com chuva perfeita e com a melhor configuração de parâmetros do método de assimilação de dados.

7.2.2 Previsão de precipitação

Devido às diferentes características dos membros do conjunto meteorológico utilizado com relação ao horizonte de previsão e ao intervalo de discretização temporal, seu uso nas previsões hidrológicas foi precedido por uma etapa de pré-processamento, que considerou duas questões principais:

- 1) Compatibilização do intervalo de tempo: A maior parte das previsões foi disponibilizada acumulada a cada 6 horas. Para compatibilizar os intervalos de tempo das previsões de precipitação ao da simulação hidrológica, de uma hora, as previsões de precipitação foram desagregadas uniformemente nesse último intervalo, como sugerido Bartholmes & Todini (2005). O horizonte de previsão foi definido em 72h, comum a todos os modelos utilizados. Foi adotada somente uma previsão diária, sendo realizada às 00:00 UTC;

2) Espacialização das informações: As previsões de precipitação são disponibilizadas pontualmente no local das estações de monitoramento na América do Sul. Para uso no modelo hidrológico, as previsões de precipitação, após sua desagregação temporal, foram interpoladas para os centróides das minibacias do modelo. O método de interpolação utilizado foi o Inverso do Quadrado da Distância (IDW).

Para avaliação do desempenho das previsões de precipitação foram consideradas duas estimativas, ambas acumuladas em 24h (01 - 00 UTC): a) a previsão de referência MSMES-M, e b) a média do conjunto meteorológico.

A avaliação do desempenho das estimativas considerou dois aspectos distintos, (a) a ocorrência do evento de precipitação e, (b) a quantidade de chuva ocorrida. Em ambas as análises foi utilizado o limiar de precipitação de 10mm/dia, considerado um evento de precipitação moderado (Komma et al.,2007). Para avaliação do desempenho das previsões de acordo com a ocorrência do evento, ou seja, a superação ou não do limiar de 10mm/dia, foram utilizados os índices H, POD, RAF e BIAS, estimados a partir de tabelas de contingência 2x2. Para avaliação do desempenho das previsões com relação à quantidade de chuva ocorrida foram utilizados o EM e o EMQ.

As medidas de desempenho para cada uma das estimativas foram resumidas em gráficos que apresentam os valores médios, máximo e o mínimo entre os todos os centróides, para as antecedências de 24h, 48h e 72h. A análise do desempenho das previsões compreendeu os períodos chuvosos na bacia entre os anos 2008 e 2011, totalizando 636 eventos de previsão, tendo sido descartados 5 eventos para os quais existem falhas na previsão MSMES-M. Para que houvesse coerência em todas as análises realizadas nessa pesquisa, o mês de abril foi considerado como pertencente ao período chuvoso, já alguns eventos hidrológicos iniciados durante o mês de março tiveram seu pico durante o mês de abril na estação Porto do Mesquita. A Figura 66 mostra os centróides das minibacias na porção da bacia do rio Paraopeba em análise.

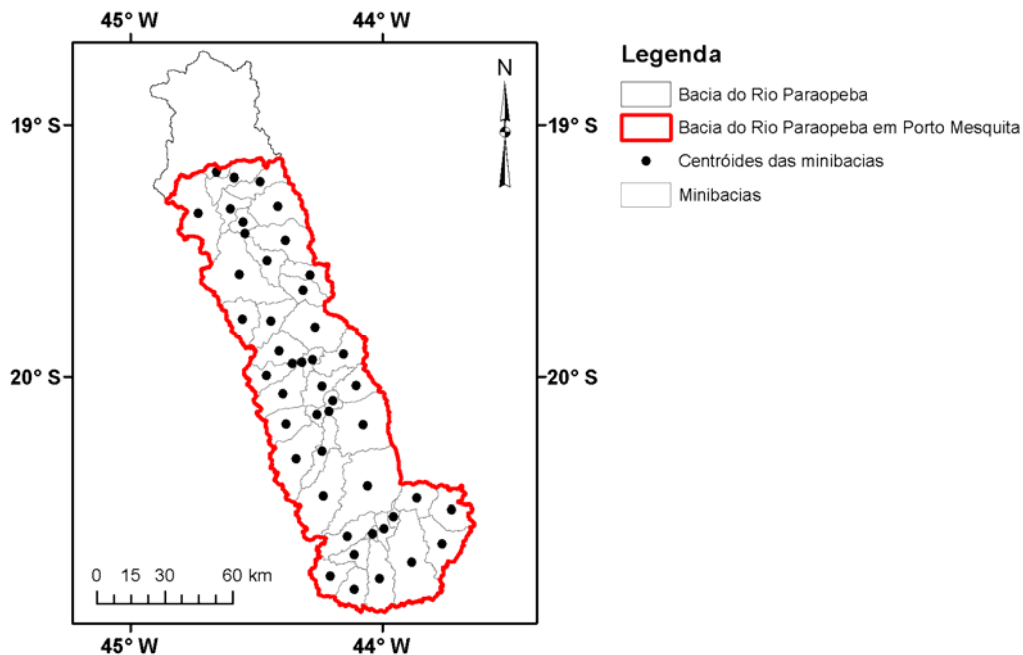


Figura 66. Minibacias e centróides do modelo hidrológico na porção da bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita.

Os resultados da avaliação das previsões de precipitação MSMES-M e da média do conjunto meteorológico são apresentadas nos itens a seguir:

7.2.2.1 Avaliação da previsão determinística de referência MSMES-M

Avaliação do desempenho quanto à ocorrência do evento de precipitação

a) Taxa de Acerto – H: Esse índice representa a proporção de eventos corretamente previstos pelo modelo, sem distinção entre a ocorrência e não ocorrência do evento, em relação ao número total de eventos. Foram observados, para as antecedências de 24h, 48h e 72h, valores médios entre 0,78 e 0,80, resultados considerados razoáveis. Em média, os melhores resultados para H são observados para a antecedência de 24h. Os valores médios do índice são ligeiramente piores para as antecedências de 48h e 72h, mantendo-se aproximadamente constantes para essas duas antecedências. A Figura 67 apresenta um resumo dos valores médios, máximos e mínimos observados para H nas antecedências avaliadas.

b) Probabilidade de Detecção-POD: Representa a proporção de acertos do modelo quando o evento de precipitação foi observado, ou seja, quando ocorreu precipitação superior a 10mm/dia. Esse índice apresentou, para as antecedências de 24h, 48h e 72h, valores médios entre 0,61 e 0,71 (Figura 67(b)), sendo que os maiores valores de POD são observados para a antecedência de 24h, decaindo gradativamente nas antecedências de 48h e 72h.

c) Razão de Alarme Falso – RAF: Representa a proporção de eventos previstos que superaram o limiar de 10mm/dia mas que não foram observados. Tem orientação negativa, ou seja, valores próximos a zero são desejáveis. Nas avaliações, o índice apresentou valores médios entre 0,48 e 0,53 para as três antecedências analisadas (Figura 67(c)), sendo os maiores valores de RAF observados para a antecedência de 72h.

d) BIAS: Representa a proporção entre o número de vezes que um evento foi previsto e observado. Quando seu valor é igual a um, o número de superações previstas foi igual ao número de eventos ocorridos. Quando o valor é superior a 1, significa que existe uma superestimativa na previsão em termos de frequência de superação do limiar de 10mm/dia. Caso contrário, existe uma subestimativa. O índice apresentou valores médios entre 1,20 e 1,43, para as três antecedências (Figura 67(d)), sendo que o maior valor médio é observado para a antecedência de 24h. Esses resultados indicam que a previsão superestima, em média, entre 20 e 43% a ocorrência de eventos de precipitação maiores que 10mm/dia na bacia, apresentando melhores resultados para as maiores antecedências.

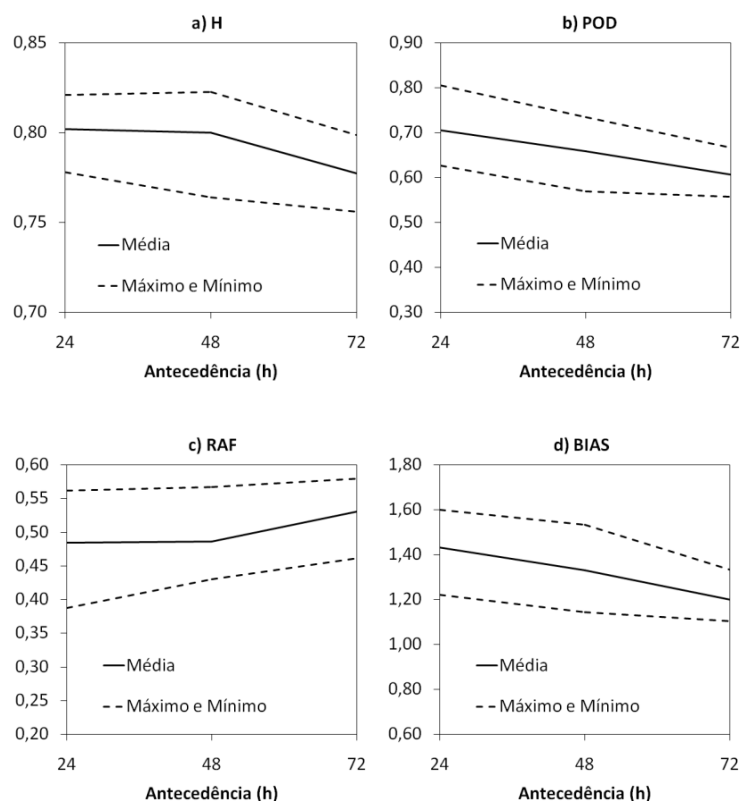


Figura 67. Valores médios, máximos e mínimos de H (a), POD (b), RAF (c) e BIAS (d) entre todos os centróides de minibacias, para a previsão de precipitação MSMES-M.

A Figura 68 apresenta como variam espacialmente na bacia as medidas de desempenho calculadas com base na tabela de contingência. Não foi possível identificar com clareza uma tendência de melhor ou pior desempenho da previsão para uma determinada região da bacia.

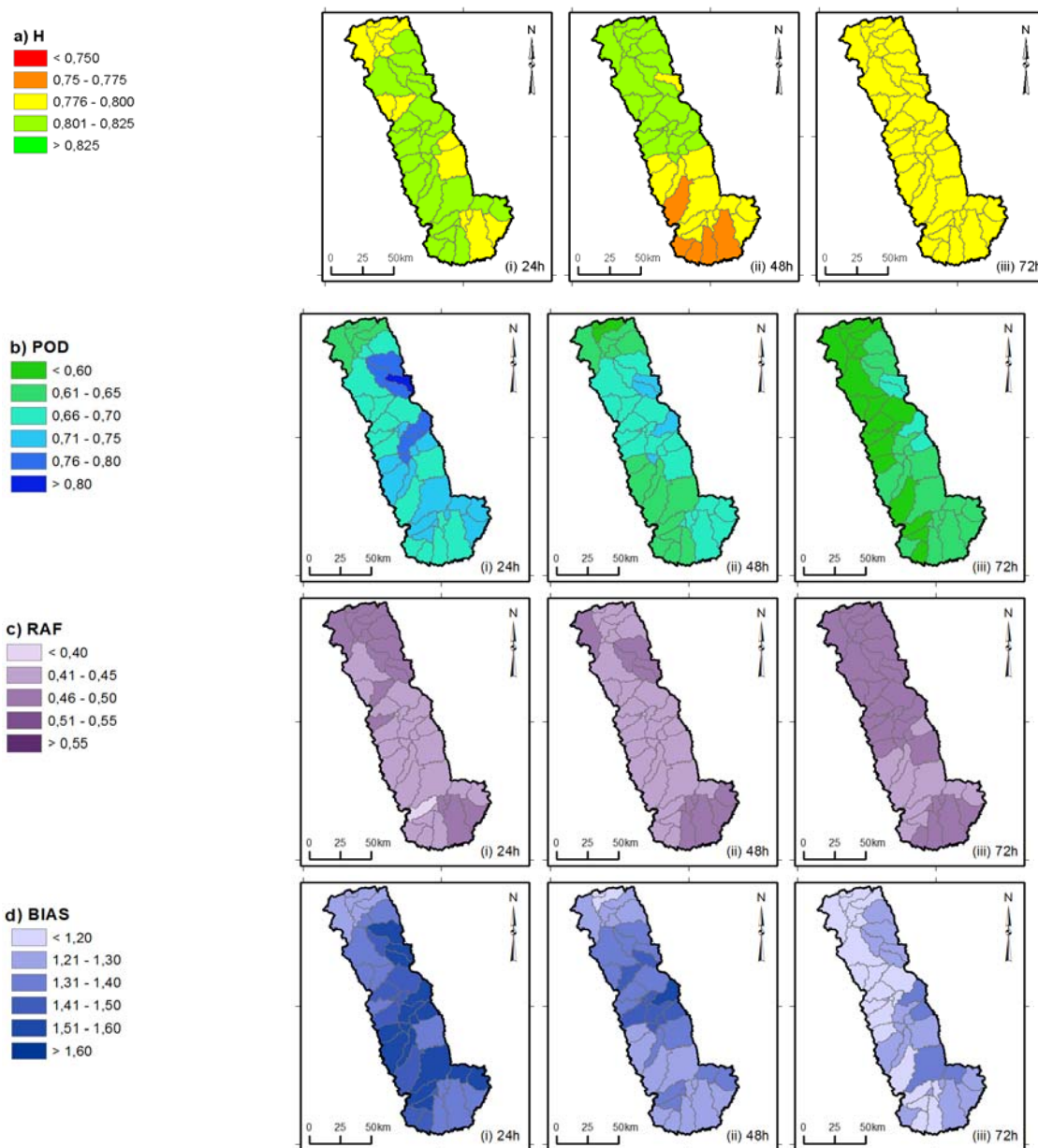


Figura 68. Distribuição espacial dos valores de H (a), POD (b), RAF (c) e BIAS (d) para a previsão de precipitação MSMES-M.

Avaliação do desempenho relação à quantidade de precipitação ocorrida

Os erros quantitativos das previsões de precipitação foram avaliados através de EM e EMQ, definidos anteriormente. A partir de EM é possível avaliar se o modelo está superestimando ou subestimando as previsões. O EMQ avalia a magnitude do erro cometido, dando maior peso para as

maiores diferenças, que normalmente ocorrem em maiores volumes de precipitação. Valores próximos à zero para essas medidas de desempenho indicam melhor desempenho do modelo. Foram ainda usados na análise das previsões o diagrama de dispersão e um gráfico de EM em função de diferentes intensidades de precipitação.

a) Erro Médio-EM: O índice apresentou valores médios entre -7,56 e -9,79mm/dia para as antecedências de 24h, 48h e 72h, o que indica uma subestimativa do total precipitado, que aumenta com o aumento da antecedência da previsão (Figura 69(a)). Esse resultado é confirmado pelo diagrama de dispersão, mostrado na Figura 70. Pode-se observar, nessa figura, uma maior concentração dos pares observação *versus* previsão abaixo da linha de 45°, sobretudo para precipitações acima de 50mm/dia, indicando uma subestimativa da previsão. Para o período de previsões analisado, a máxima precipitação observada foi cerca de 150mm/dia, enquanto a máxima precipitação prevista, cerca de 90mm/dia, o que evidencia a dificuldade da previsão MSMES-M em prever eventos de maior intensidade.

Com o objetivo de avaliar o desempenho das previsões para diferentes magnitudes de precipitação observadas, foi construído um gráfico de EM em função de diferentes intensidades de precipitação observadas, para diferentes antecedências, mostrado na Figura 71. Os resultados indicam que a subestimativa do modelo ocorre em todas as faixas de intensidade de precipitação avaliadas. Essa subestimativa aumenta, de modo geral, com a intensidade e com o aumento da antecedência.

b) Erro Médio Quadrático-EMQ: Apresentou valores médios entre 17,01mm/dia e 18,42mm/dia para as três antecedências analisadas. Como ocorre com o EM, o EMQ aumenta com o aumento da antecedência das previsões, indicando diminuição no desempenho da previsão MSMES-M nesse sentido.

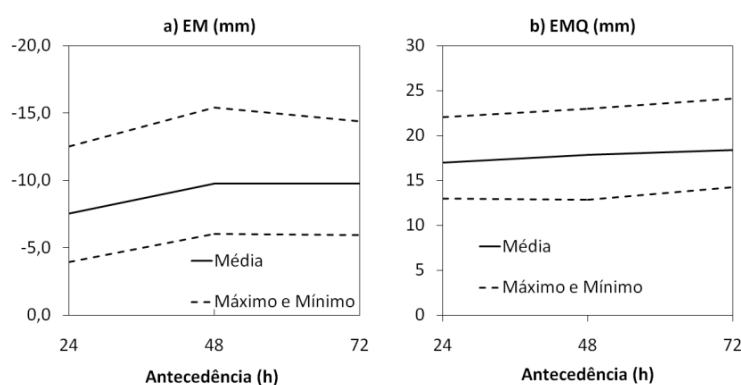


Figura 69. Valores médios, máximos e mínimos de EM (a) e EMQ (b) entre todos os centróides de minibacias, para a previsão de precipitação MSMES-M.

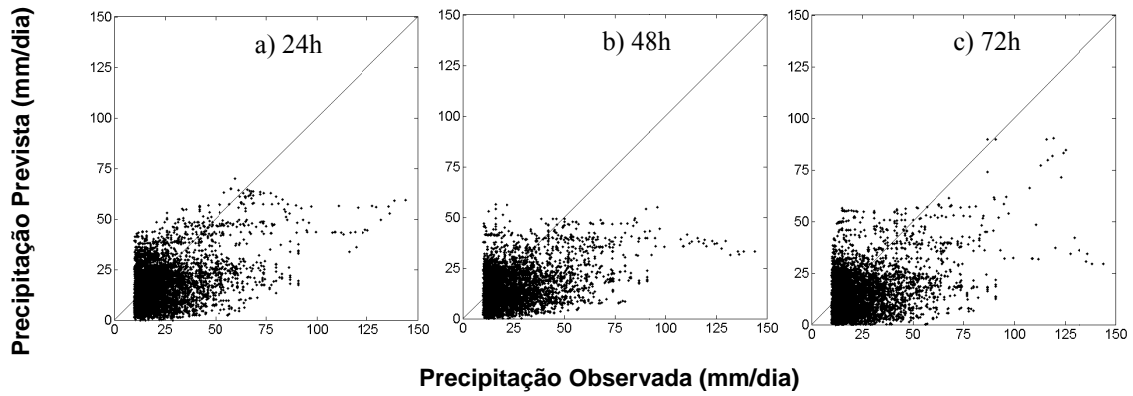


Figura 70. Diagrama de dispersão precipitação observada *versus* precipitação prevista para a previsão de precipitação MSMES-M.

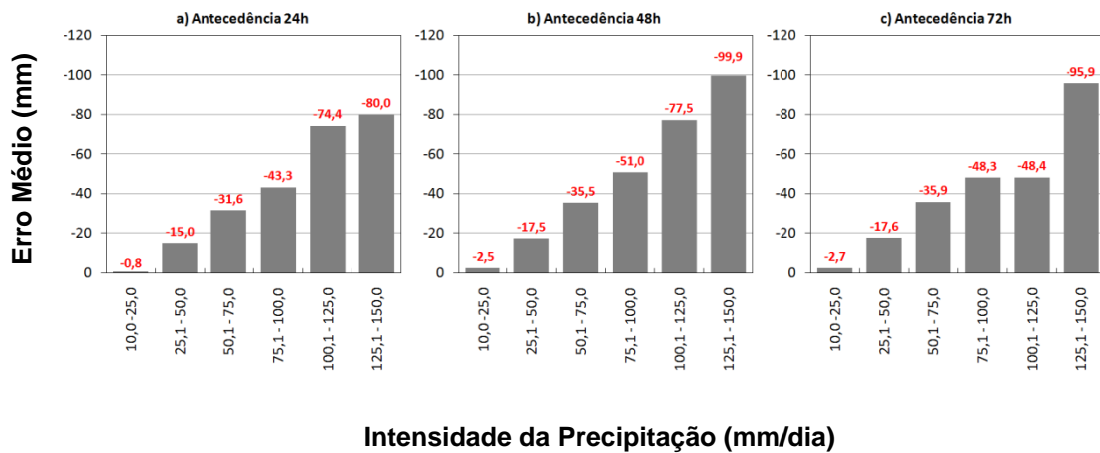


Figura 71. Valores de EM em função da intensidade de precipitação para a previsão de precipitação MSMES-M.

A Figura 72 apresenta como variam espacialmente o EM e o EMQ. Os resultados sugerem pior desempenho da previsão MSMES-M, nos extremos norte e sul e na região central da bacia, onde são observados os maiores gradientes de precipitação em nível anual.

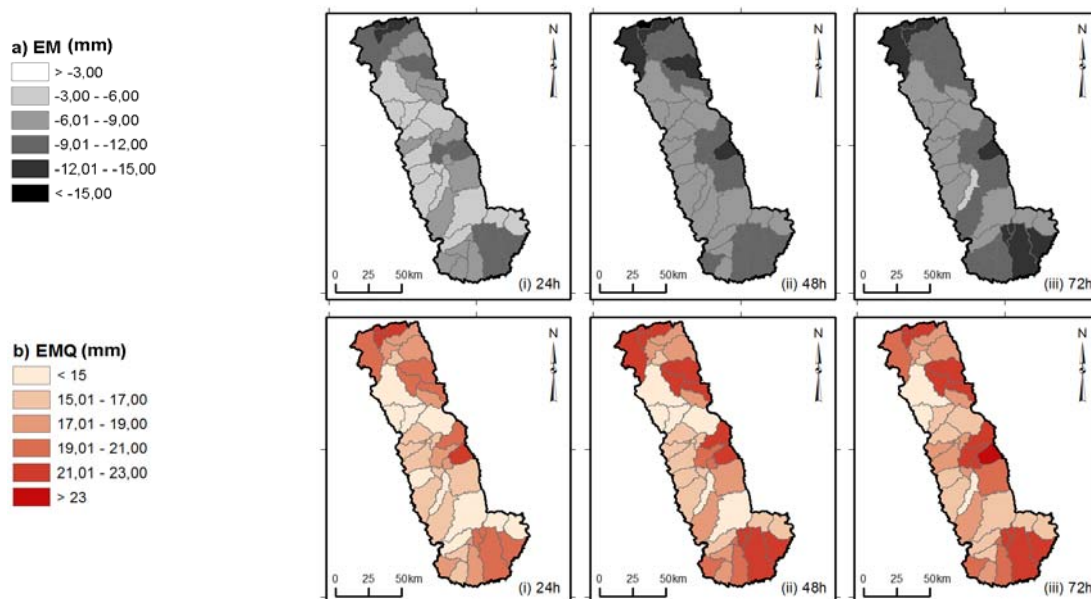


Figura 72. Distribuição espacial dos valores de EM (a) e EMQ (b) para a previsão de precipitação MSMES-M.

7.2.2.2 Avaliação da média do conjunto meteorológico

Avaliação do desempenho quanto à ocorrência do evento de precipitação

a) Taxa de Acerto – H: Foram observados, para as antecedências de 24h, 48h e 72h, valores médios na região da bacia entre 0,79 e 0,82 (Figura 73(a)). Em média, os melhores resultados para H são observados para a antecedência de 48h. Os valores médios do índice são ligeiramente piores para as antecedências de 24h e 72h.

b) Probabilidade de Detecção-POD: O índice POD apresentou valores médios entre 0,61 e 0,73 entre antecedências (Figura 73(b)), sendo as maiores proporções de detecção observadas para a antecedência de 24h, decaindo gradativamente nas antecedências de 48h e 72h.

c) Razão de Alarme Falso – RAF: O índice RAF apresentou, para as antecedências de 24h, 48h e 72h, valores médios entre 0,49 e 0,51 e mínimos e máximos de, respectivamente, 0,36 e 0,59 (Figura 73(c)). As maiores e menores razões de alarmes falsos foram observadas, respectivamente, para as antecedências de 24h e 48h.

d) BIAS: O índice BIAS apresentou valores médios para as três antecedências avaliadas entre 1,22 e 1,45 (Figura 73(d)), sendo que o maior valor médio é observado para a antecedência de 24h. Esses resultados indicam que o modelo superestima, em média, entre 22 e 45% a ocorrência de eventos de precipitação maiores que 10mm/dia para as antecedências de 24h, 48h e 72h. As superestimativas diminuem com o aumento da antecedência.

A Figura 74 apresenta para a média do conjunto meteorológico como variam espacialmente as medidas de desempenho baseadas na tabela de contingência. Assim como ocorreu com a previsão MSMES-M, não foi possível identificar um padrão espacial na variação dessas medidas de desempenho na Figura 74.

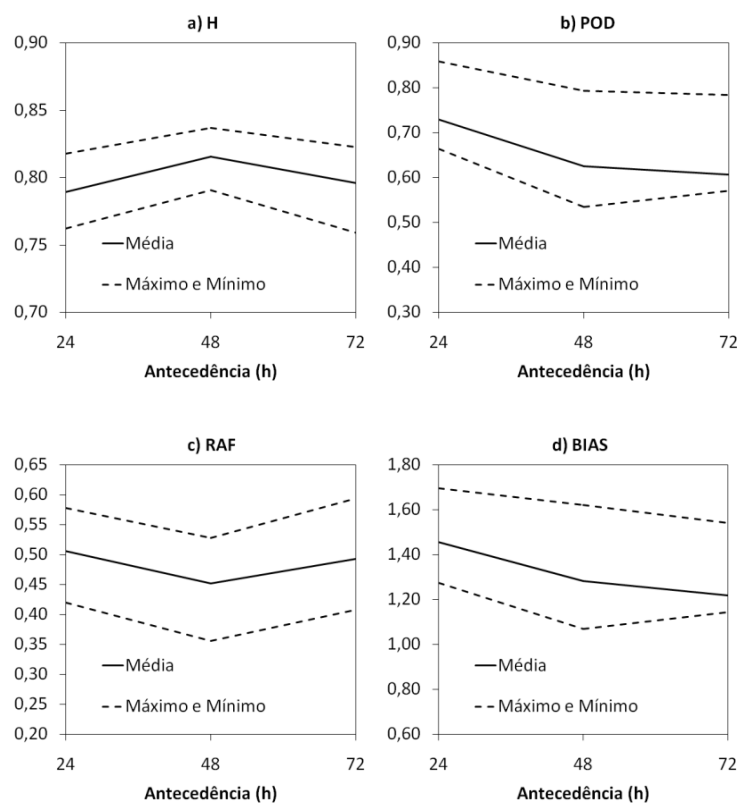


Figura 73. Valores médios, máximos e mínimos de H (a), POD (b), RAF (c) e BIAS (d) entre todos os centróides de minibacias, para a média do conjunto meteorológico.

Avaliação do desempenho relação à quantidade de precipitação ocorrida

a) Erro Médio – EM: Os valores médios de EM, para as antecedências de 24h, 48h e 72h, variaram entre -7,31mm/dia e -11,09mm/dia (Figura 75(a)). Como ocorre para a previsão de referência MSMES-M, há uma subestimativa do total precipitado, para todas as antecedências avaliadas. A Figura 76, mostra o Diagrama de Dispersão. Nessa figura fica evidente a subestimativa apresentada pela média do conjunto, observada para todas as antecedências. A precipitação máxima prevista no período de análise, considerando todas as antecedências, foi cerca de 60mm/dia, enquanto a máxima precipitação observada, foi cerca de 150mm/dia. O gráfico da Figura 77 mostra os valores de EM para diferentes intensidades de precipitação, para as três antecedências avaliadas. Observe-se, de modo geral, uma subestimativa da média do conjunto que aumenta com a antecedência e a intensidade de precipitação. Somente para a faixa de entre 10-25mm/dia na antecedência de 24h, é observada uma pequena superestimativa.

b) Erro Médio Quadrático – EMQ: EMQ apresentou valores médios entre 18,46mm/dia e 19,96mm/dia (Figura 75(b)), entre as diferentes antecedências. Os valores de EMQ aumentam com o aumento da antecedência das previsões, indicando diminuição no desempenho da média do conjunto nesse sentido.

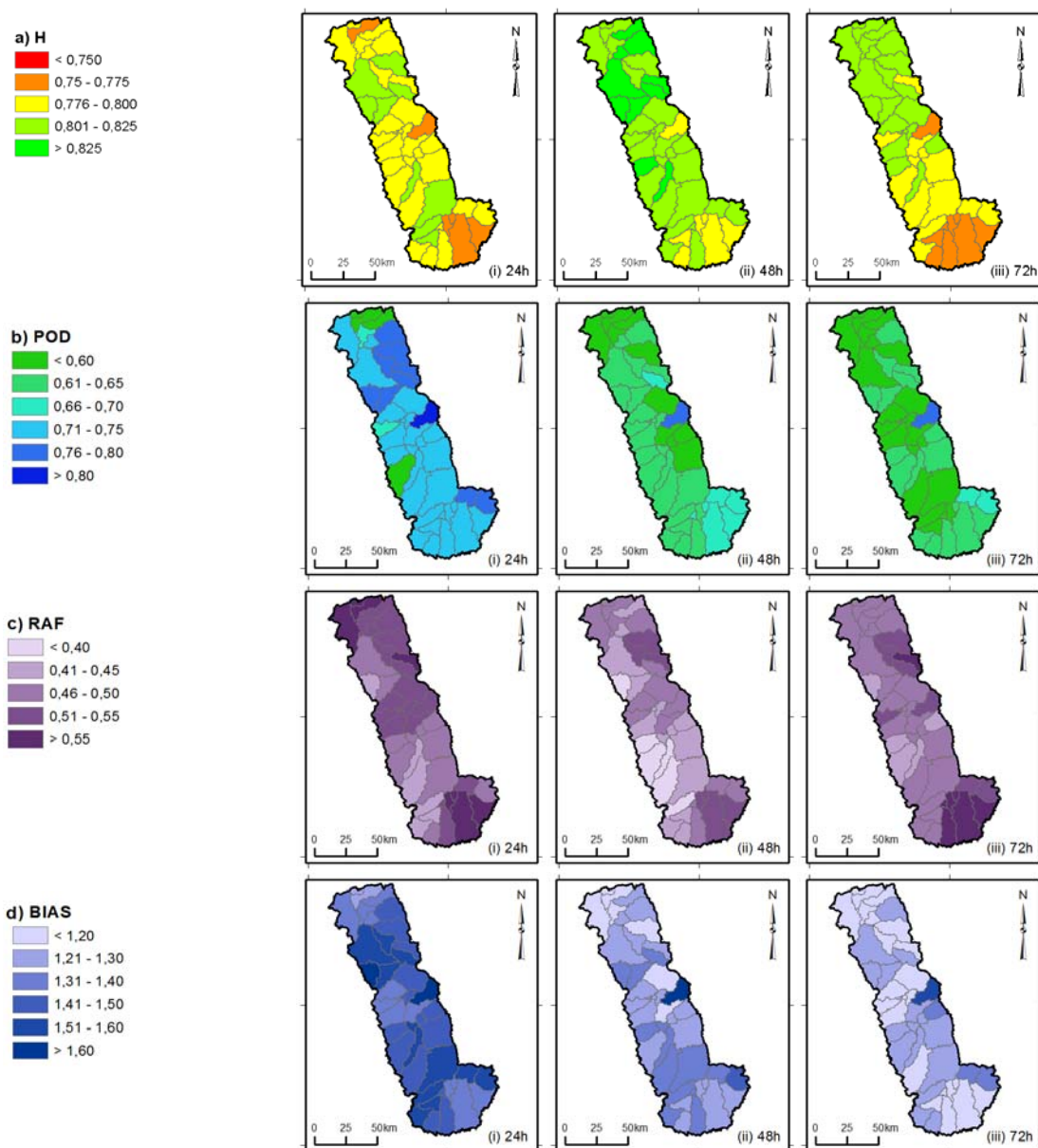


Figura 74. Distribuição espacial dos valores de H (a), POD (b), RAF (c) e BIAS (d) para a média do conjunto meteorológico.

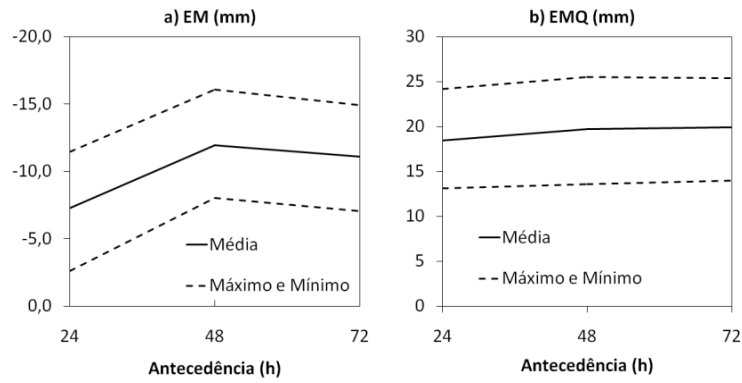


Figura 75. Valores médios, máximos e mínimos de EM (a) e EMQ (b) entre todos os centróides de minibacias, para a média do conjunto meteorológico.

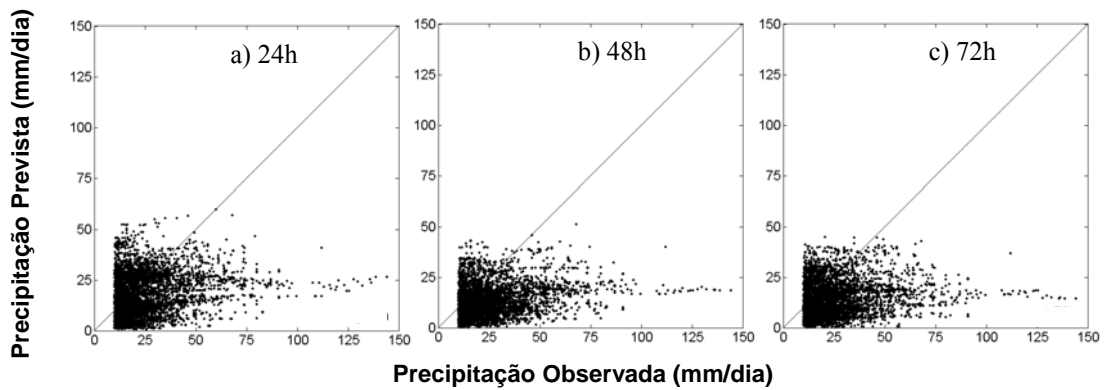


Figura 76. Diagrama de dispersão precipitação observada *versus* precipitação prevista para a média do conjunto meteorológico.

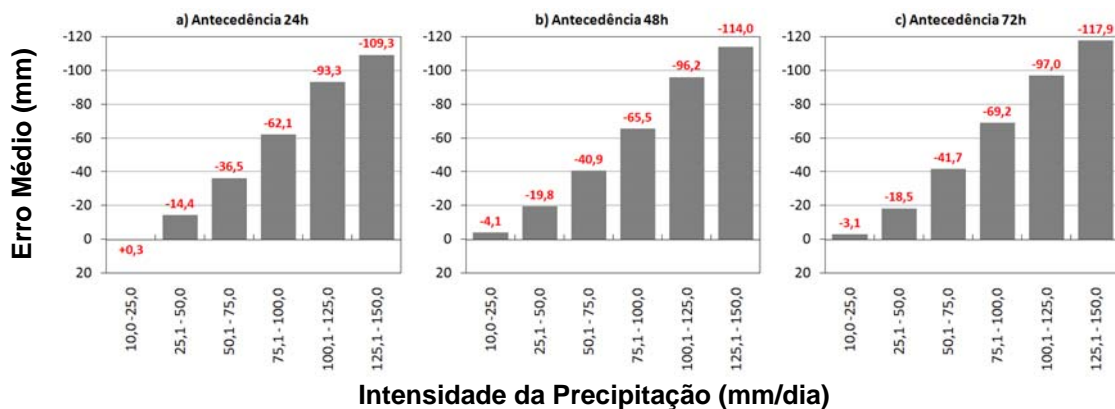


Figura 77. Valores de EM em função da intensidade de precipitação para a média do conjunto meteorológico.

A Figura 78 apresenta como variam espacialmente na bacia os valores de EM e EMQ. Assim como foi observado para a previsão MSMES-M, os resultados para ambos os índices sugerem pior desempenho da média do conjunto nos extremos norte e sul e na região central da bacia.

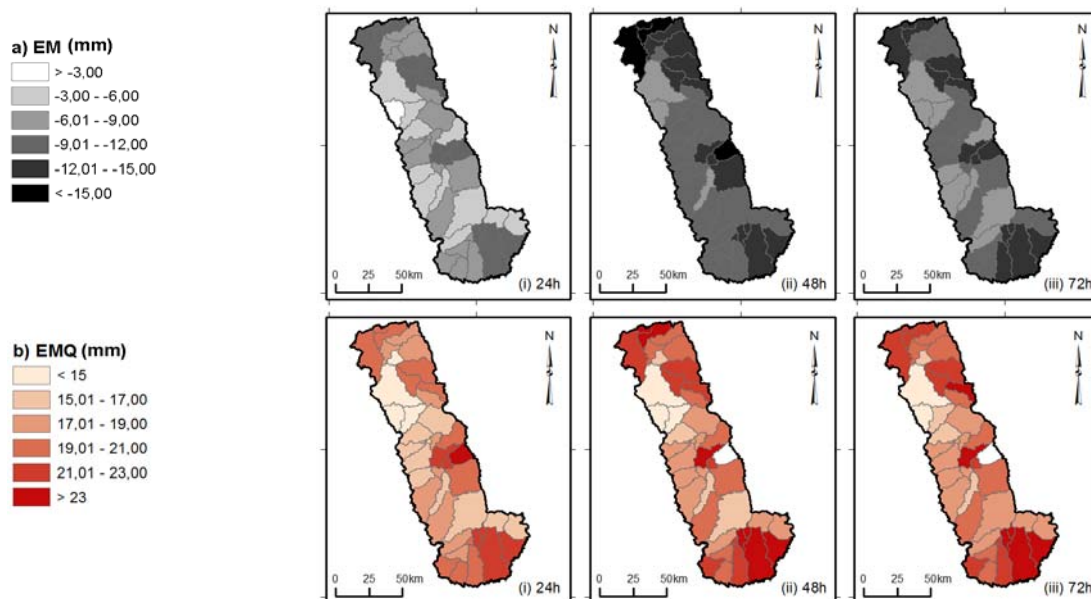


Figura 78. Distribuição espacial dos valores de EM (a) e EMQ (b) para a média do conjunto meteorológico.

7.2.2.3 Resumo e resultado da comparação entre as previsões de precipitação MSMES-M e a média do conjunto meteorológico

As avaliações do desempenho das previsões de precipitação foram realizadas para os três períodos chuvosos (out-abr) compreendidos entre os anos 2008 e 2011, perfazendo 631 eventos de previsão. As estimativas avaliadas nesse procedimento foram a previsão determinística de referência MSMES-M e o conjunto meteorológico, através de sua média.

Na avaliação do desempenho as estimativas de precipitação foram acumuladas em 24h, sendo analisadas nas antecedências de 24h, 48h e 72h. Foi considerada a região da bacia até a estação fluviométrica Porto do Mesquita, onde são analisadas as previsões de cheia. O desempenho das previsões foi investigado sob dois aspectos distintos: (a) discernimento sobre a ocorrência ou não do evento de precipitação e, (b) a quantidade da precipitação ocorrida. Para avaliação das previsões com relação ao aspecto em (a) foram usados quatro medidas de desempenho (H, POD, RAF e BIAS), estimadas com base em tabelas de contingência. Para avaliação do desempenho das previsões com relação à quantidade precipitada, foram usados EM e EMQ. Em ambas as análises foi utilizado o limiar de precipitação de 10mm/dia. As medidas de desempenho foram calculadas ponto-a-ponto, para cada centróide das minibacias do modelo hidrológico. Tanto os dados observados como previstos foram interpolados para os pontos de análise pelo método do Inverso do Quadrado da Distância-IDW.

A Figura 79 apresenta uma comparação entre os valores médios de H, POD, RAF, BIAS, EM e EMQ para as previsões MSMES-M e a para a média do conjunto meteorológico. Com relação ao desempenho das previsões em (a), as duas estimativas apresentaram resultados similares, alternando-se como “melhor estimativa” dependendo da medida de desempenho e antecedência considerada, como mostra a Figura 79. A previsão MSMES-H, por exemplo, apresentou melhores resultados em termos de POD para as antecedências de 48h e 72h. A média do conjunto, por sua vez, apresentou menores valores de RAF para essas mesmas antecedências. O desempenho das duas estimativas se mostraram ainda semelhantes aos obtidos em estudos análogos, utilizando outros modelos PNT (Previsão Numérica do Tempo), em bacias ou regiões próximas a bacia do rio Paraopeba (e.g. Pinto et al. 2005; Oliveira et al., 2000; Silva et al., 2000).

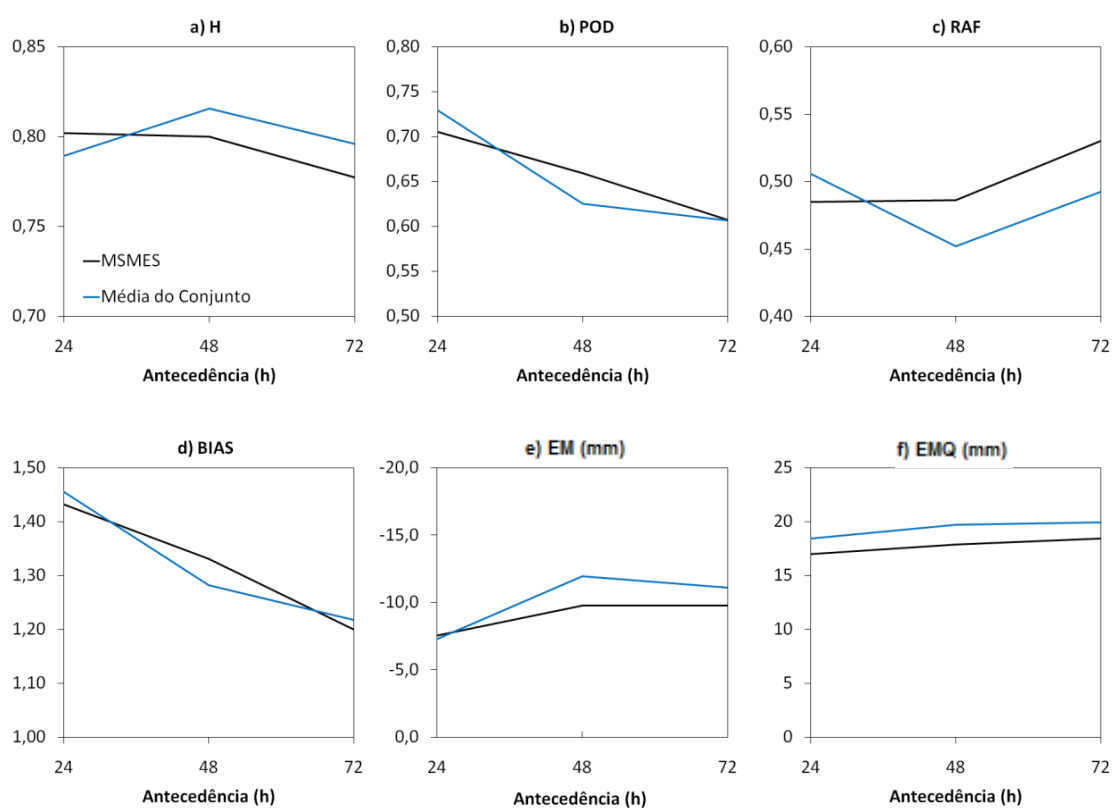


Figura 79. Valores médios de H (a), POD (b), RAF (c), BIAS (d), EM (e) e EMQ (f) entre todos os centróides de minibacias, para as previsões MSMES-M e a média do conjunto meteorológico.

Na avaliação do desempenho das previsões em relação ao item (b), observou-se que as duas previsões subestimam a precipitação em todas as antecedências avaliadas, como mostra a Figura 79(e). As subestimativas aumentam, de modo geral, com o aumento da intensidade da precipitação e da antecedência, sendo que a estimativa MSMES-M subestima menos os totais precipitados que a média do conjunto, mostrando melhor desempenho. A Figura 79(f) mostra uma comparação do resultado das previsões em termos de EMQ, ratificando o melhor desempenho da previsão

MSMES-M na avaliação da quantidade de precipitação ocorrida, o que justifica seu uso como referência na avaliação dos resultados das previsões de vazões por conjunto. Com relação à variação espacial do desempenho, as duas previsões avaliadas apresentaram pior desempenho na estimativa da quantidade de chuva precipitada na região central e nos extremos norte e sul da bacia, onde existem os maiores gradientes de precipitação em nível anual.

7.2.3 Previsão de cheias por conjunto

As previsões de vazões na estação Porto do Mesquita foram realizadas retrospectivamente no período entre ago/2008 e mai/2011, com horizonte de 72h e frequência de um dia, no horário 00:00 UTC, conforme disponibilidade dos dados de previsão de precipitação. Para alimentar o modelo hidrológico foram utilizados um conjunto de previsões de precipitação (conjunto meteorológico) além da previsão determinística MSMES-M, usada como referência na avaliação dos resultados das previsões de cheia por conjunto. Em algumas das análises foram ainda utilizados os resultados das previsões com chuva zero e com chuva perfeita. Os parâmetros do modelo hidrológico e do método de assimilação de dados utilizados foram àqueles resultantes da calibração do modelo hidrológico e da análise do procedimento de assimilação de dados, apresentados respectivamente nos itens 7.1.3 e 7.2.1.

Foram adotadas com propósito investigativo quatro vazões limites, determinadas a partir de uma análise de frequência da série de vazões horárias da estação fluviométrica Porto do Mesquita. A Tabela 11 apresenta os limites estabelecidos, siglas e condições hidrológicas hipotéticas. Esses limites foram utilizados em dois tipos de avaliação: a) avaliação do desempenho das previsões em eventos dicotômicos, e b) avaliação do desempenho das previsões determinísticas em diferentes faixas de magnitude de vazões.

Tabela 11. Vazões limites adotadas para avaliação das previsões de cheias.

Vazão Limite/Sigla	Quantil*	Nível de alerta/condições hidrológicas hipotéticas	Vazão (m ³ /s)
Q20%	80%	Normal: vazões típicas durante o período de cheias.	177,0 m ³ /s
Q5%	95%	Médio: vazões acima do normal no período de cheias, mas não são esperadas inundações.	382,5 m ³ /s
Q2%	98%	Alto: possibilidade de vazões próximas ao limite da calha menor.	538,5 m ³ /s
Q1%	99%	Severo: extravasamento da calha menor, com possibilidade de ocorrências de inundações.	623,5 m ³ /s

* Calculado com base na série de dados de vazão horários (2000 a 2011) da estação Porto do Mesquita.

A Q20%, igual a 177m³/s, representa uma situação típica de cheias na estação Porto do Mesquita e tem valor próximo a vazão média durante os períodos chuvosos (out-abr) entre 2000-2011. A vazão limite Q1%, igual a 623,5m³/s, indica uma situação hipotética de extravasamento da calha menor do rio Paraopeba nesse local. Essa vazão limite tem tempo de retorno de cerca de 1,25

anos, estimado a partir da distribuição de Gumbel ajustada a série de vazões máximas diárias anuais da estação Porto da Taquara (~40 anos de dados), corrigida por uma relação de área (~1,17) com a estação Porto do Mesquita. Uma compilação de estudos publicados para rios de diferentes tamanhos e características, apresentada Schneider et al. (2011), mostra que a vazão a “calha cheia” (*bank-full flow*) possui, na maior parte dos casos, período de retorno médio entre 1,3 e 1,7 anos, sugerindo razoabilidade do valor estimado para essa condição hidrológica. As demais vazões limites, Q5% e Q2%, representam níveis intermediários.

Na avaliação dos resultados foram somente analisadas as previsões realizadas entre 01/out a 31/abr de cada um dos três anos hidrológicos entre 2008 e 2011, que definem aproximadamente os períodos chuvosos na bacia. A Figura 80 apresenta as vazões observadas e a chuva média sobre a bacia definida pela estação Porto do Mesquita no período entre 2008-2011, além das vazões limites. Na parte superior da Figura 80, os retângulos na cor amarela delimitam os três períodos chuvosos, que incluem 636 eventos de previsão, sendo 212 previsões por período chuvoso. Nessas análises foram descartados 5 eventos para os quais existem falhas na previsão MSMES-M.

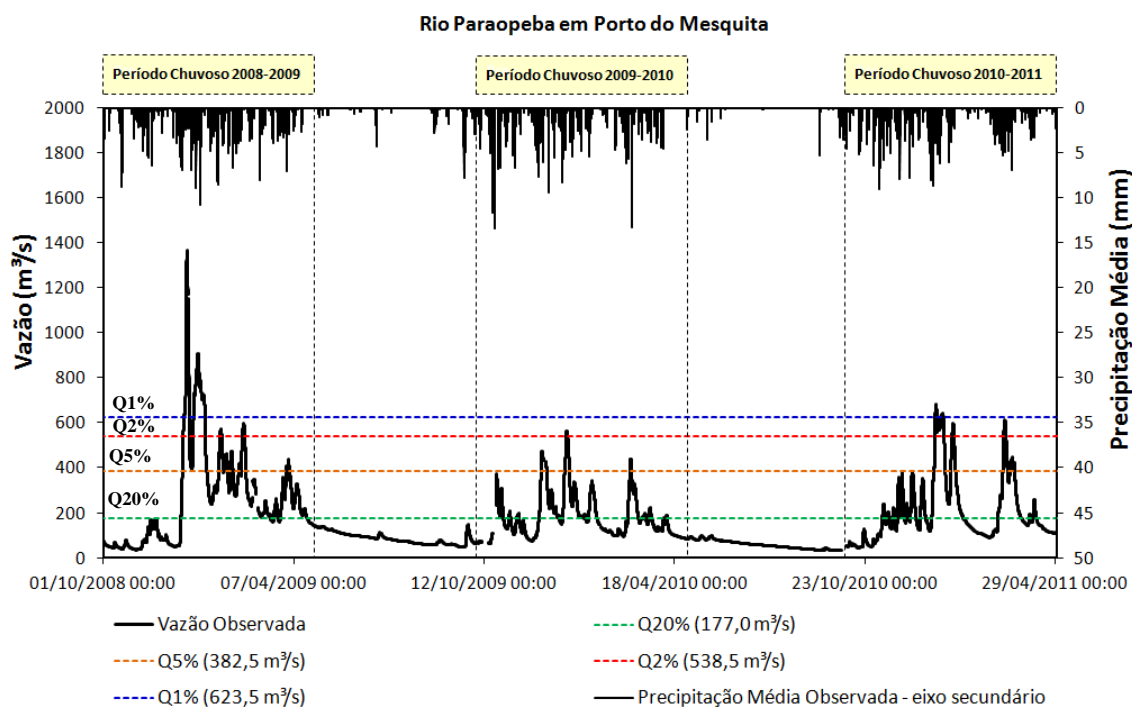


Figura 80. Vazões e precipitação média observadas na bacia do rio Paraopeba em Porto do Mesquita entre out/2008 e abr/2011. As linhas tracejadas em cores representam as diferentes vazões limites.

A seguir são apresentados os resultados das previsões de cheia divididos em quatro partes: a) Caracterização geral dos períodos chuvosos; b) Análise visual das previsões; c) Avaliação determinística, e; d) Avaliação probabilística. No final do capítulo é apresentada a análise de alguns

dos principais eventos ocorridos ao longo dos três períodos chuvosos através de Diagramas de Excedência.

7.2.3.1 Caracterização geral dos períodos chuvosos entre 2008 e 2011

De modo geral, ao longo dos três períodos chuvosos entre os anos de 2008 e 2011, os primeiros eventos de cheia na bacia ocorrem durante os meses de outubro e novembro. Esses eventos apresentam pequena magnitude, com vazões de pico entre 200m³/s e 400 m³/s. A partir da segunda quinzena de novembro, as chuvas na bacia se intensificam, assim como a ocorrência de eventos de cheia. Os maiores eventos de cheia ocorrem entre a segunda quinzena de dezembro e a primeira quinzena de janeiro. A partir do mês de março até o mês de abril, devido à diminuição das chuvas na bacia, ocorrem eventos menores, mas de magnitude superior aos registrados no início do período chuvoso. A Tabela 12, apresenta algumas características dos principais eventos de cheia por ano hidrológico, registrados entre 2008 e 2011. Os anos hidrológicos que apresentaram eventos de cheia com maior e menor magnitude em termos das vazões de pico foram, respectivamente, os anos hidrológicos 2008-2009 e 2009-2010. No Anexo 5 é apresentada uma caracterização com maior detalhe de cada um dos três períodos chuvosos (out-abr) entre 2008 e 2011.

Tabela 12. Maiores eventos de cheia ocorridos nos anos hidrológicos entre 2008 e 2011.

Ano Hidrológico	Pico do Evento (m ³ /s)	Data do Pico	TR (anos)*
2008-2009	1366	22/12/2008 18:00 UTC	46,1
2009-2010	563,5	01/01/2010 09:00 UTC	1,1
2010-2011	683,5	01/01/2011 01:00 UTC	1,5

*Tempo de retorno estimado com base na série de vazões máximas diárias anuais da estação Ponte da Taquara (vide Figura 30) corrigida por uma relação de áreas (~1,17) com a estação Porto do Mesquita.

7.2.3.2 Avaliação visual das previsões

Nesse item são apresentados, por período chuvoso, os resultados da avaliação visual das previsões de cheia para alguns dos principais eventos hidrológicos ocorridos entre 2008 e 2011.

7.2.3.2.a Ano hidrológico 2008-2009

As Figuras 80 e 81 apresentam os resultados da previsão hidrológica para dois eventos de cheia ocorridos nesse período chuvoso. No eixo principal das abscissas aparecem, entre outros, os hidrogramas da previsão hidrológica de todos os membros do conjunto (em cinza), o conjunto médio (em vermelho) e a previsão determinística de referência MSMES-H (em azul), e no eixo secundário invertido, a previsão de precipitação média do conjunto meteorológico sobre a bacia e os quantis de 10% e 90%.

A Figura 81, apresenta os resultados das previsões durante o maior evento de cheia registrado entre out/2008 e abr/2009, o maior da série histórica da estação Porto do Mesquita

(2000-2011). Nas primeiras duas previsões (dias 16 e 17/12/2008) mostradas na Figura 81, as previsões por conjunto apresentaram espalhamento suficiente para captar toda a faixa de valores observados, sendo que a média do conjunto hidrológico e a previsão hidrológica MSMES-H apresentam resultados similares e razoáveis. Pode-se observar ainda na previsão do dia 16/12/2008 que alguns membros do conjunto já prevêem a superação da Q1%, antecipando um possível cenário de cheias na região.

A partir da previsão do dia 18 de dezembro (Figura 81), fica evidente a influência do erro no tempo de pico (~30h) cometido pelo modelo na simulação do hidrograma (linha tracejada na cor cinza) no desempenho das previsões. Embora a assimilação de dados de vazão aproxime as previsões das observações nas antecedências iniciais, para as maiores antecedências as previsões tendem a assumir valores de vazões próximos aos obtidos na simulação, o que leva a erros consideráveis na previsão de cheias nesse evento. Observa-se ainda que os erros nas previsões são maiores a partir da vazão limite que representa o extravasamento da seção transversal ($Q1\%=623,5\text{m}^3/\text{s}$), o que poderia estar relacionado a um efeito da planície de inundação na propagação do escoamento, não considerada no modelo. Mesmo assim, as previsões mostram utilidade na previsão de superação ou não de determinado limite, especialmente na ascensão do hidrograma, como pode ser observado nas previsões dos dias 18, 19 e 20/12/2008.

A Figura 82 apresenta as previsões realizadas entre os dias 12 e 18/02/2009, durante o segundo evento selecionado. Na ascensão do hidrograma, mostrado nas previsões dos dias 12, 13 e 14/02/2009, o conjunto apresenta um espalhamento que abrange grande parte de vazões observadas, sendo o pico do evento (dia 14/02/2009) bem representado tanto pelo conjunto médio como pela previsão MSMES-H. Na previsão do dia 13/02/2009, a média do conjunto e a previsão MSMES-H não prevêem a superação da Q5% na antecedência de 72h, captada por alguns dos membros do conjunto, mostrando benefício pela utilização do conjunto sobre previsões determinísticas na antecipação das cheias. Na recessão dos hidrogramas os resultados são bastante bons (dias 16 a 18/02/2009). Nesse caso há uma concordância de todas as previsões com um espalhamento reduzido do conjunto, já que diminuem as precipitações na bacia, como mostram as previsões de precipitação do conjunto meteorológico no eixo secundário invertido do gráfico.

7.2.3.2.b Período chuvoso do ano hidrológico 2009-2010

Na ascensão do hidrograma do primeiro evento apresentado para esse período chuvoso, mostrado nas previsões entre os dias 02 e 06/12/2009 da Figura 83, os resultados são considerados razoáveis. O conjunto apresenta espalhamento que capta grande parte das observações, notadamente às 72h de antecedência, mostrando uma tendência de superestimativa das vazões. O conjunto médio apresenta bom desempenho, especialmente na previsão do dia 04/12/2009, onde as

vazões previstas se aderem perfeitamente às observações na ascensão do hidrograma ao longo de todo horizonte de previsão. Na previsão desse mesmo dia, alguns dos membros do conjunto já prevêem a superação da Q5%, ocorrida durante o dia 05/12/2009. A previsão MSMES-H também apresenta bons resultados, sobretudo para as previsões realizadas nos dias 05 e 06/12/2009, onde se observa o pico do hidrograma do evento.

No maior evento ocorrido período no ano hidrológico 2009-2010, apresentado na Figura 84, os resultados são semelhantes. As previsões na ascensão do hidrograma são relativamente boas, especialmente a dos membros do conjunto e do conjunto médio, nos dias 27 e 28/12/2009. No caso particular da previsão do dia 28/12/2009, a maior parte dos membros, assim como o conjunto médio, preveem corretamente a superação da Q5% às 72h, não indicada pela previsão MSMES-H. Já no pico do hidrograma, na previsão do dia 29/12/2009 as previsões tem desempenho um pouco inferior, sendo que a previsão MSMES-H apresenta desempenho superior a qualquer um dos membros do conjunto e mesmo ao conjunto médio.

7.2.3.2.c Ano hidrológico 2010-2011

A Figura 85, mostra o evento ocorrido no final de dezembro de 2010, o maior observado nesse ano hidrológico. Pode-se observar, na ascensão do hidrograma, que a previsão por conjunto tem espalhamento suficiente para captar grande parte das vazões observadas, especialmente nas antecedências próximas ao horizonte de previsão. A média do conjunto apresenta resultados razoáveis, como mostram as previsões dos dias 27 e 28/12/2009, prevendo bem a superação das vazões limites. No pico do hidrograma, mostrado nas previsões dos dias 29 a 31/12/2009, o desempenho da média do conjunto é um pouco inferior, observando-se uma subestimativa. A previsão MSMES-H, por sua vez, apresenta desempenho inferior ao da média do conjunto, mostrando uma tendência de subestimativa.

Para o segundo evento selecionado, ocorrido entre os dias 13 e 22/01/2011 e mostrado na Figura 86, as previsões são relativamente melhores que do primeiro evento analisado para esse período chuvoso. Na ascensão do hidrograma a previsão por conjunto assim como o conjunto médio apresentam bons resultados, como mostram as previsões entre os dias 13 e 16/01/2011. A previsão MSMES-H, apresenta resultados razoáveis, sobretudo na previsão do dia 16/01/2011, no pico do evento de cheia.

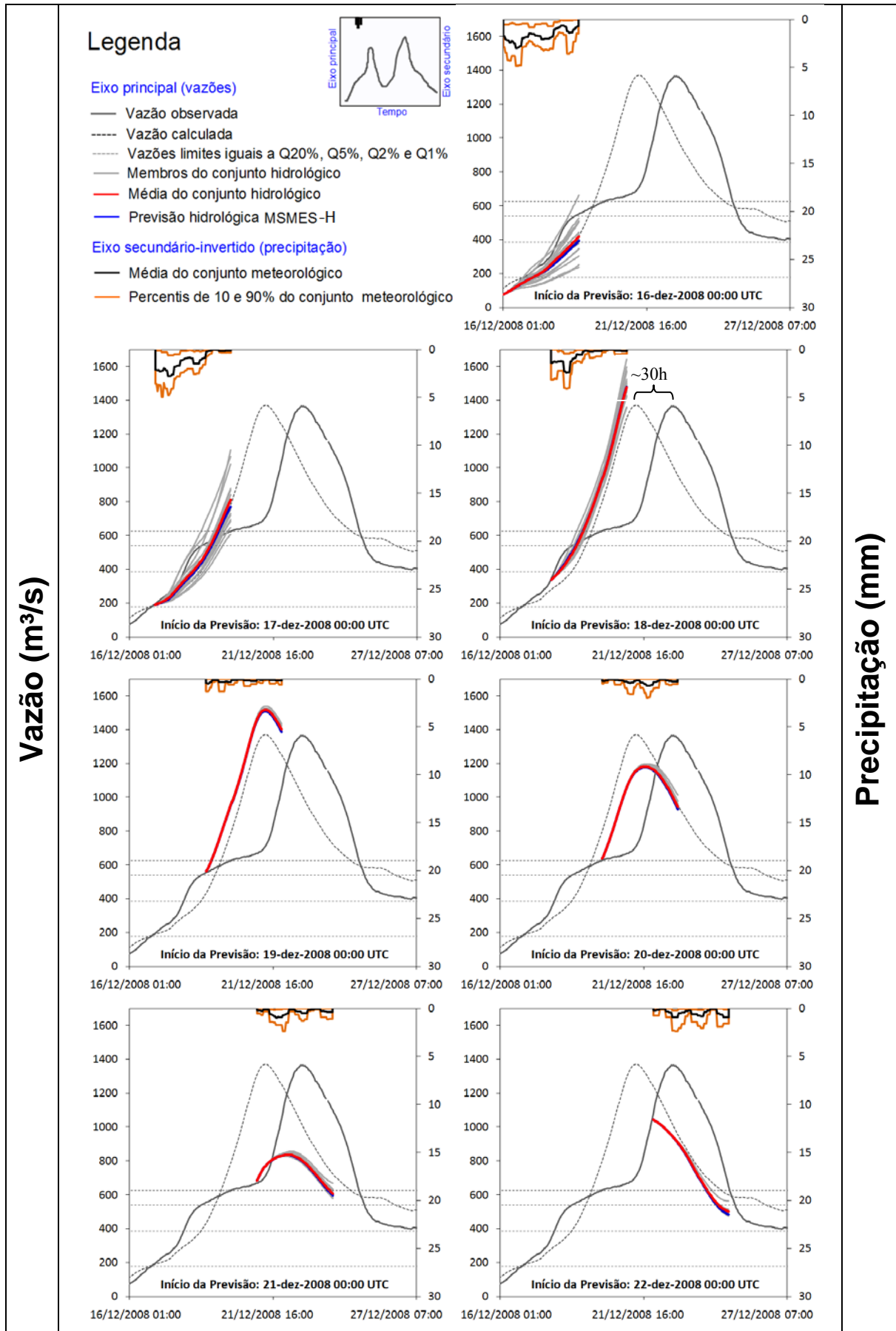


Figura 81. Previsões de cheia no período entre 18/12/2008 e 22/12/2008.

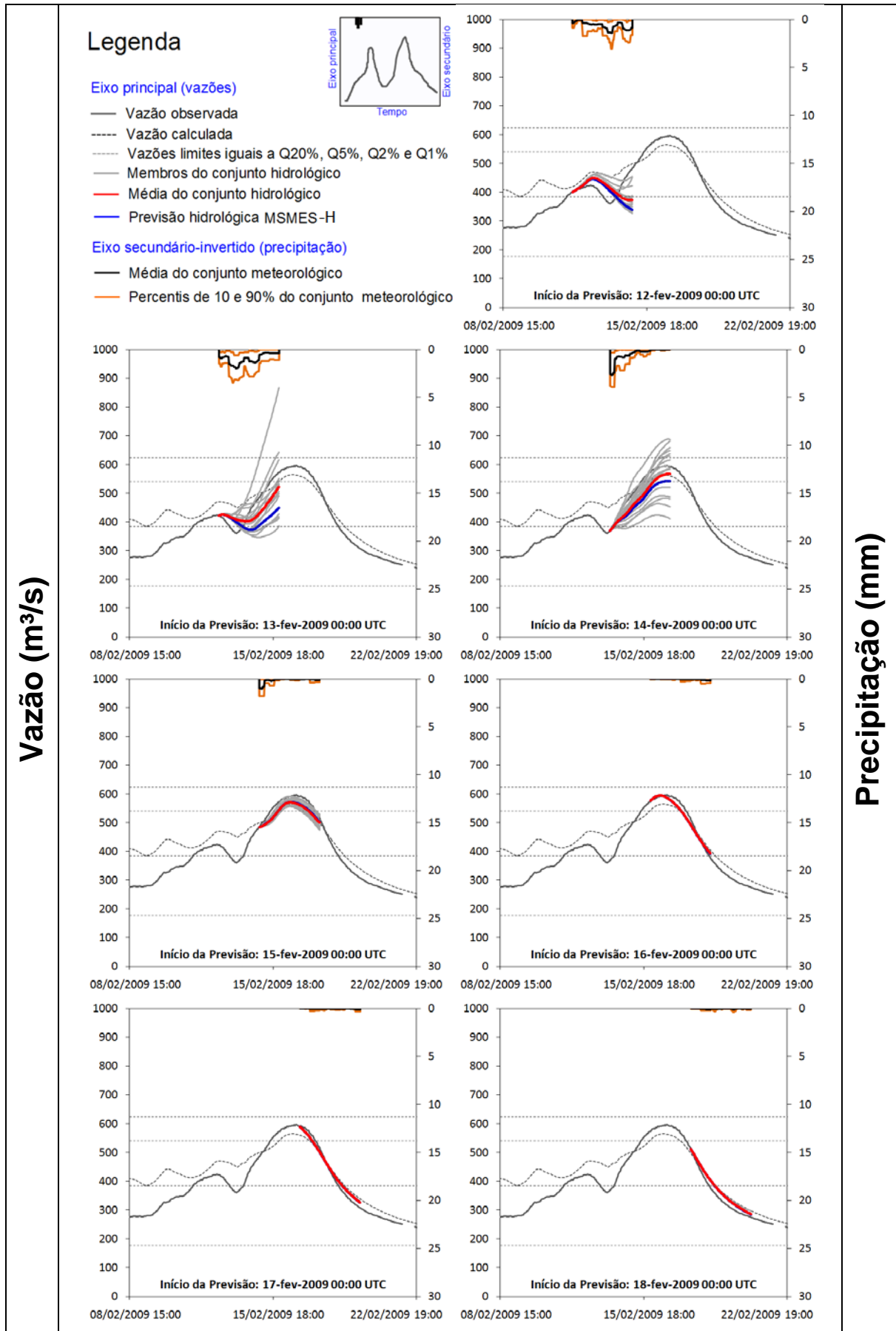
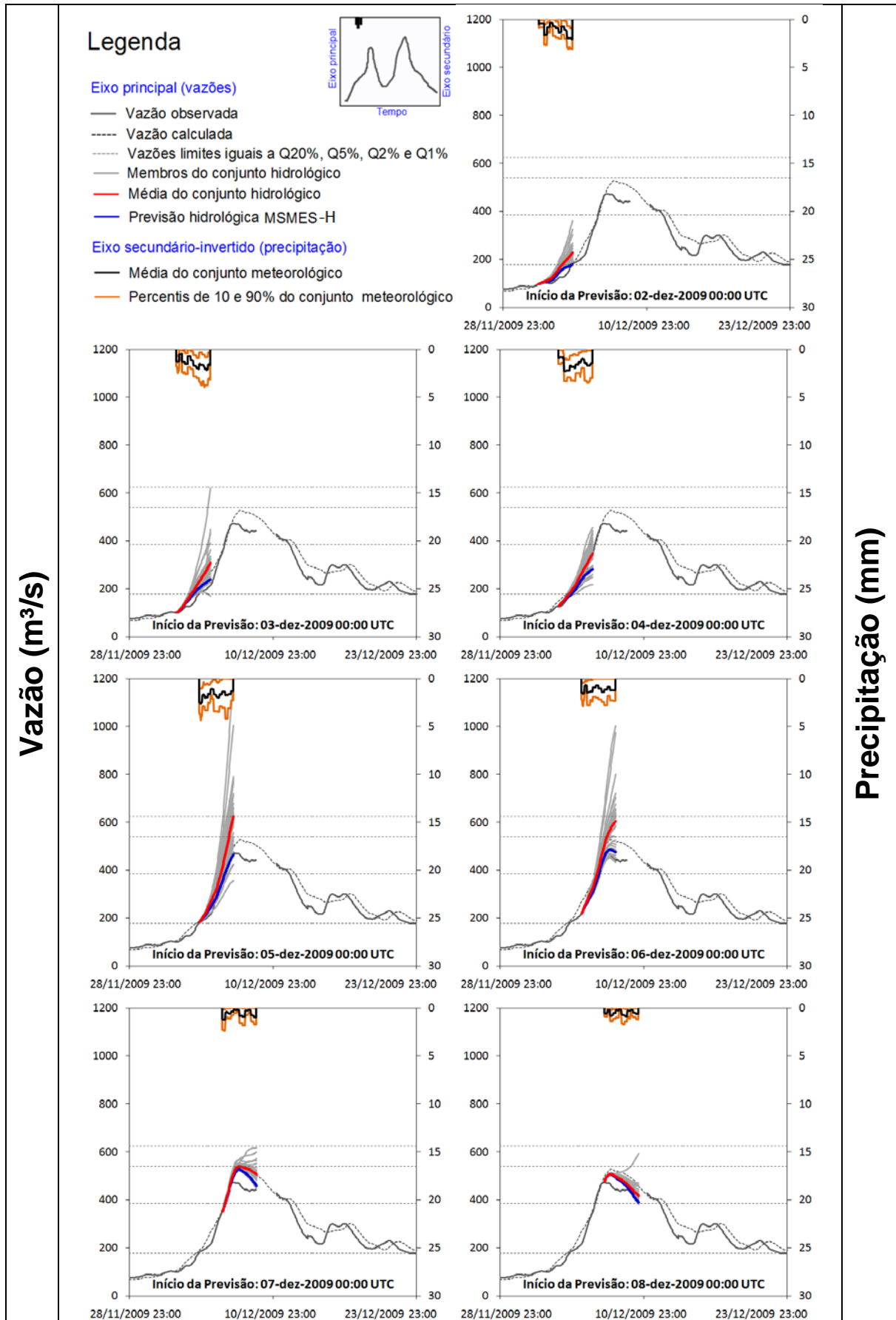


Figura 82. Previsões de cheia no período entre 12/02/2009 a 18/02/2009.



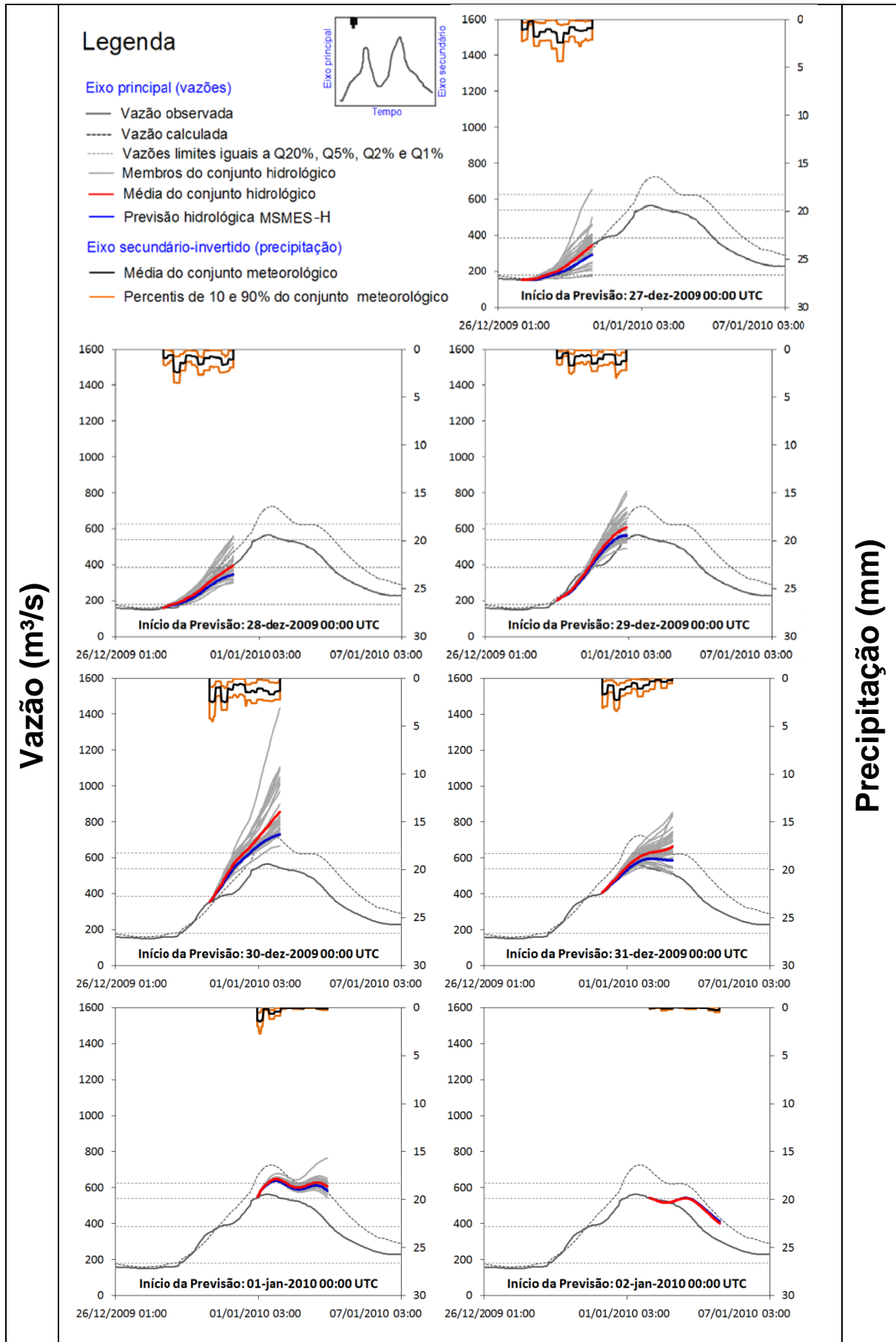


Figura 84. Previsões de cheia no período entre 27/12/2009 e 02/01/2010.

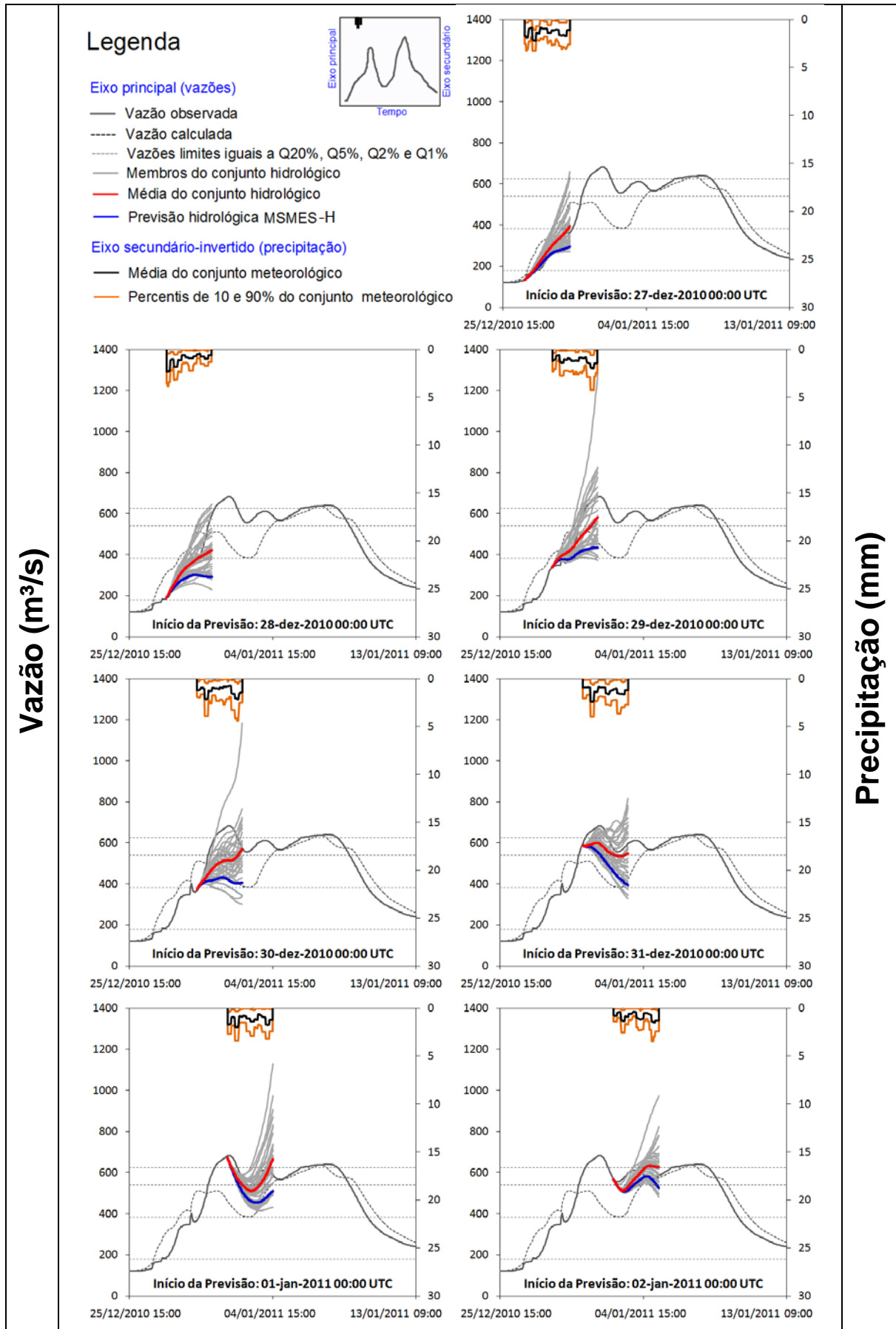


Figura 85. Previsões de cheia no período entre 27/12/2010 e 02/01/2011.

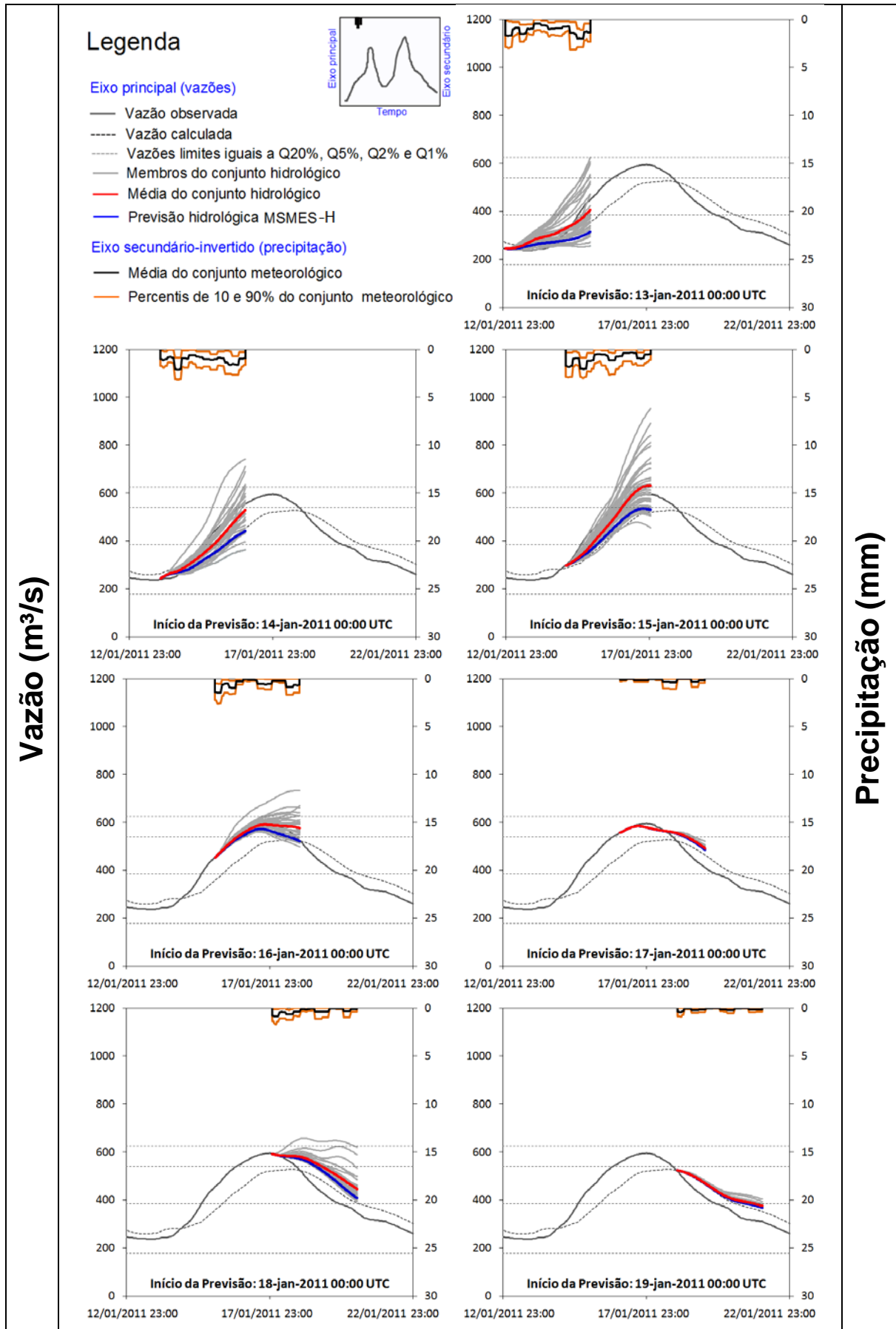


Figura 86. Previsões de cheia no período entre 13/01/2011 e 19/01/2011.

7.2.3.3 Avaliação determinística

Na avaliação do desempenho da média do conjunto foram usadas quatro medidas de desempenho: Coeficiente de Nash-Sutcliffe-NS, Coeficiente de Persistência-CP, Erro Médio-EM e Erro Médio Quadrático-EMQ. Os resultados das previsões foram avaliados para diferentes faixas de magnitude de vazões observadas, como também considerando todos os dados observados. A Figura 87 indica o tamanho da amostra (pares observação; previsão) ao longo do horizonte de previsão usada no cálculo das medidas de desempenho tanto na avaliação determinística como probabilística. A variação do tamanho da amostra ao longo do horizonte de previsão para as diferentes faixas de magnitude de vazões deve-se a existência de falhas nos dados de vazão observados.

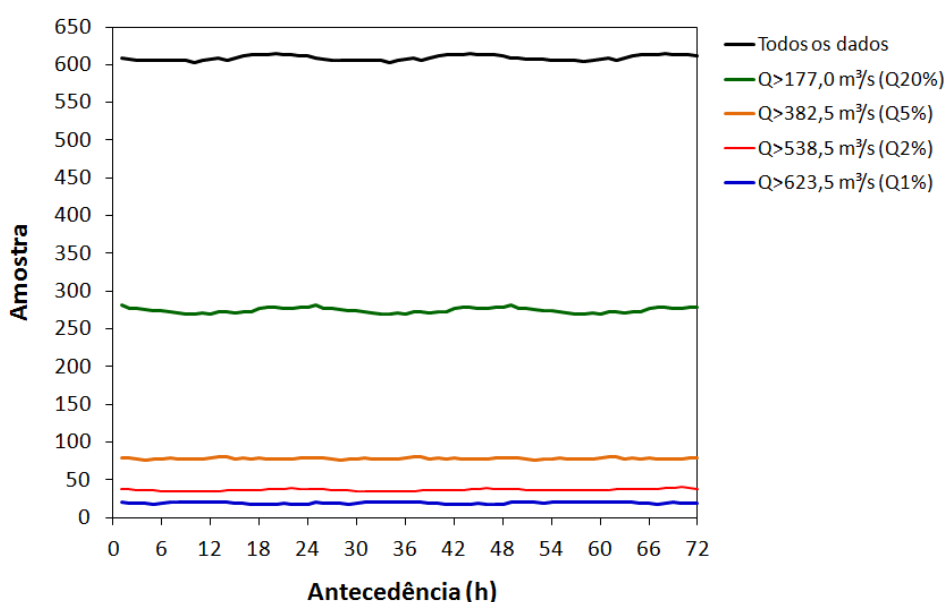


Figura 87. Tamanho da amostra, para diferentes faixas de magnitude de vazões, no período entre out/2008 e abr/2011.

A Figura 88(i), apresenta os resultados das previsões com a média do conjunto em termos do NS. Pode-se observar que as previsões, independente da faixa de magnitude das vazões observadas, apresentam valores superiores a 0,70, para qualquer antecedência, mantendo valores maiores que 0,80 em antecedências de até 40 horas. A tendência de diminuição do desempenho da previsão ao longo do horizonte também é observada na Figura 88(iii) e (iv), que mostram EM e o EMQ. Pode-se ainda observar que o desempenho da média do conjunto, de modo geral, é menor para faixas de vazões de maior magnitude, para todas as medidas de desempenho.

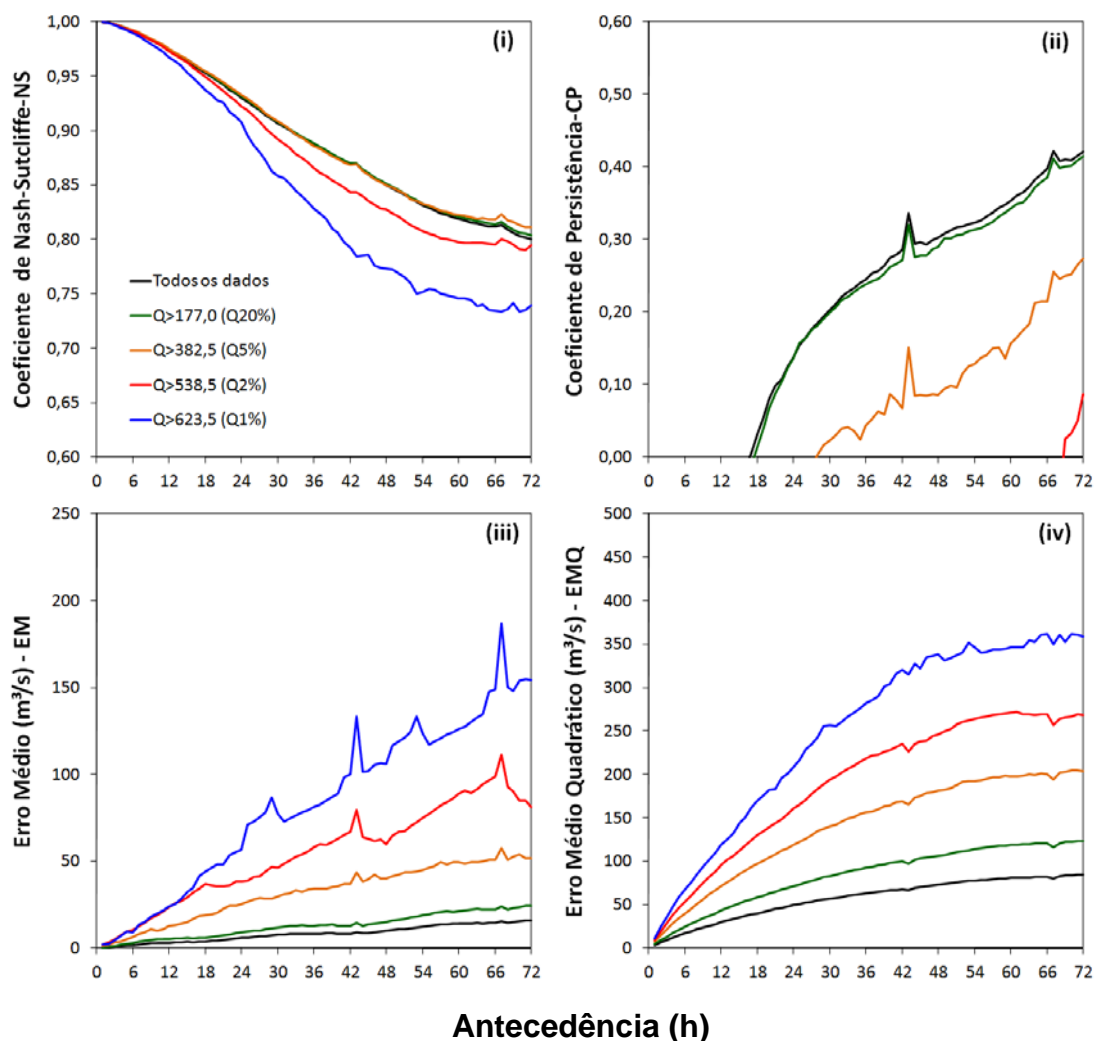


Figura 88. Resultados das previsões com a média do conjunto hidrológico para diferentes faixas de magnitude de vazões observadas: (i) Coeficiente de Nash-Sutcliffe; (ii) Coeficiente de Persistência; (iii) Erro Médio; e (iv) Erro Médio Quadrático.

Na Figura 88(ii), é mostrado os resultados das previsões em termos de CP. Os resultados mostrados nessa figura indicam que o benefício das previsões em se utilizar a média do conjunto sobre se prever o último valor observado (persistência) aumenta quando são consideradas na avaliação faixas de vazões observadas de menor magnitude. Para faixas de magnitude de vazões observadas maiores que a Q20%, por exemplo, existe benefício sobre a persistência a partir das 17h de previsão. Para faixas de vazões observadas acima da Q1%, no entanto, os valores de CP ao longo de todo horizonte de previsão são negativos, mostrando que não há benefício sobre a persistência no horizonte considerado. Esse resultado possui forte influência das previsões realizadas durante o mês de dez/08 e jan/2009 (vide Figura 81), onde foram observados erros significativos nas previsões, sobretudo para as faixas de vazão maiores que 600m³/s. As instabilidades observadas nos valores de CP nas antecedências de 42h e 62h, também observadas para outras medidas de desempenho, devem-se ao tamanho relativamente pequeno da amostra,

sobretudo para faixas de vazão observadas de maior magnitude. O erro médio das previsões, mostrado na Figura 88(iii), indica uma superestimativa das previsões, que aumenta com a antecedência e a magnitude das vazões observadas.

A Figura 89 apresenta uma comparação dos resultados em termos de NS, CP, EM e EMQ para a média do conjunto hidrológico, a previsão MSMES-H e as previsões com chuva zero e chuva perfeita. Essa análise considerou previsões para faixas de magnitudes de vazões observadas superiores a Q20% (177m³/s), que representa um cenário típico de cheias na bacia. Até a antecedência de cerca de 30h, todas as previsões apresentaram desempenhos semelhantes (Figuras 88(i), (ii) e (iv)), o que se está relacionado ao tempo de resposta da bacia aos eventos de precipitação, como previamente comentado. A partir dessa antecedência, as previsões com chuva perfeita e chuva zero apresentaram, respectivamente, o melhor e o pior desempenho nas previsões, como esperado. As previsões com precipitação prevista (média do conjunto meteorológico e a previsão MSMES-H), por sua vez, apresentaram superioridade às previsões ingênua (persistência) e com chuva zero, principalmente nas maiores antecedências, mostrando que existe benefício pela incorporação da previsão de precipitação na ampliação do horizonte de previsão de cheias. Observa-se ainda que a previsão MSMES-H apresenta desempenho similar, ligeiramente superior, à média do conjunto.

Na Figura 89(iii) são apresentados os resultados das previsões determinísticas em termos de EM. Observa-se que, com exceção da previsão com chuva zero, todas as previsões apresentam uma superestimativa para a maior parte das antecedências do horizonte de previsão. A superestimativa mostra que as incertezas associadas às previsões de precipitação não são propagadas linearmente na previsão hidrológica, uma vez que foram observadas subestimativas das previsões de precipitação. Isso ocorre devido tanto à natureza não linear do processo de transformação chuva-vazão assim como a influência das condições iniciais do modelo hidrológico nas previsões, que se mostrou fonte dominante de incerteza sobre a precipitação prevista em parte horizonte de previsão.

O desempenho de cada um dos membros do conjunto foi ainda comparado com a média do conjunto para faixas de magnitude de vazões observadas acima da Q20%, em termos do índice CM, definido anteriormente pela Equação 22. Essa medida de desempenho compara os resultados das previsões dos membros do conjunto com a previsão dada pelo conjunto médio. Valores positivos indicam melhor desempenho do membro avaliado em relação à média do conjunto ao longo de todo horizonte de previsão. Valores negativos, por outro lado, indicam melhores resultados do conjunto médio.

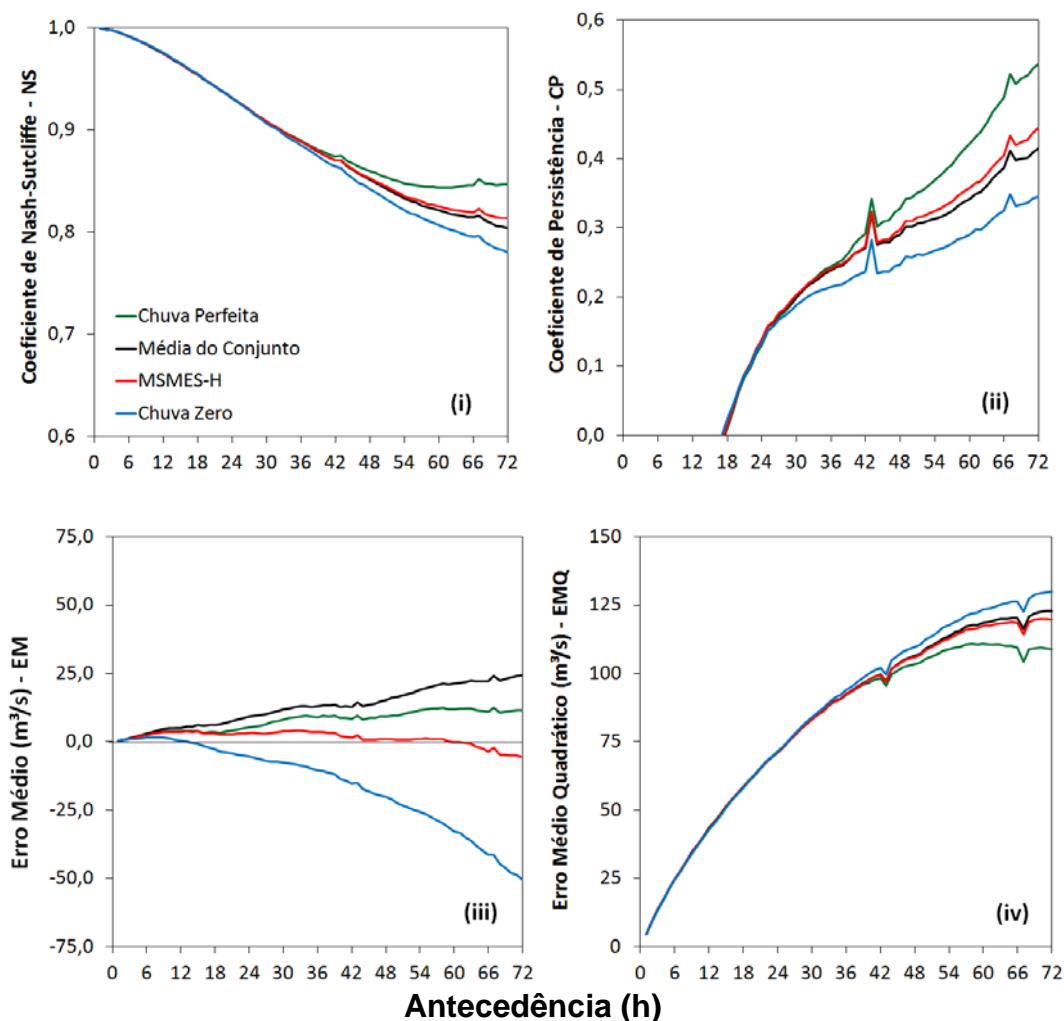


Figura 89. Comparação entre os resultados das previsões com a média do conjunto hidrológico (linha em preto), com a previsão MSMES-H (linha em vermelho) e com as previsões com chuva zero (linha em azul) e com chuva perfeita (linha em verde) para faixas de magnitude de vazão observadas superiores a Q20% (177m³/s).

A Figura 90 mostra os resultados das avaliações em termos de CM. Observa-se que média do conjunto possui desempenho significativamente melhor que a maior parte dos membros (colunas em azul), apresentando resultados similares, ligeiramente inferiores, às previsões de quatro membros (colunas em vermelho). Esse resultado mostra que, de modo geral, existe benefício do uso da média do conjunto sobre a utilização individual dos membros do conjunto. É importante salientar que as amostras usadas no cálculo de CM para cada um dos membros do conjunto são diferentes, já que nem todos os modelos estão disponíveis para todas as previsões realizadas durante o período considerado. Dessa forma, os resultados dessa avaliação não servem para comparar o desempenho dos membros do conjunto entre si.

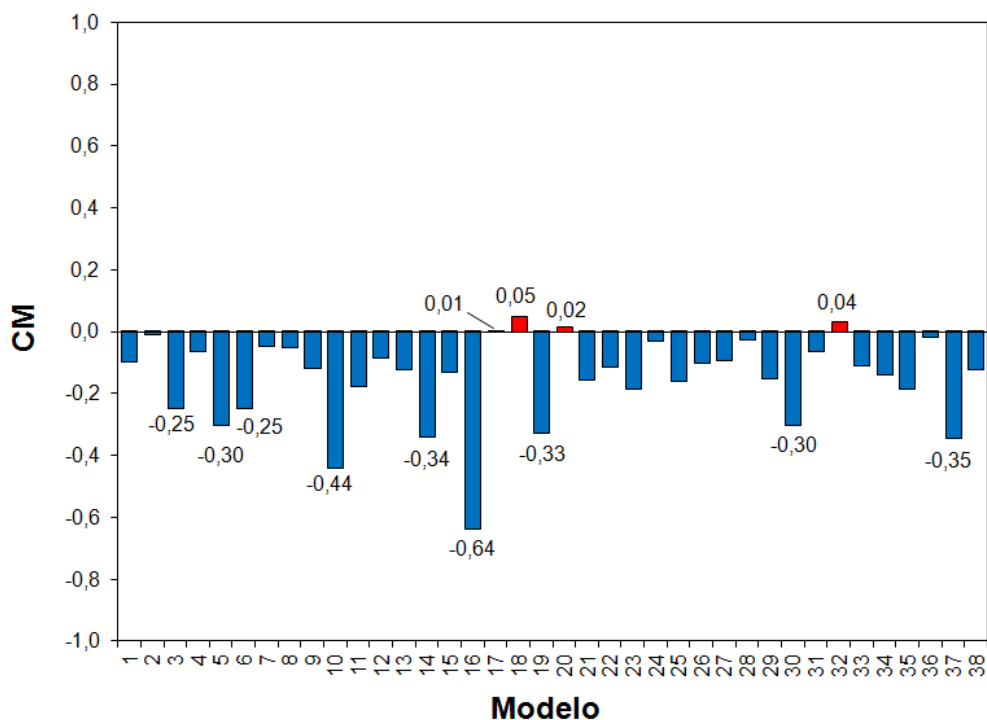


Figura 90. Comparação dos resultados das previsões com o conjunto médio e cada um dos membros do conjunto hidrológico em termos de CM. Valores positivos indicam melhor desempenho do conjunto médio. Valores negativos indicam melhor desempenho do membro.

7.2.3.4 Avaliação probabilística

Para avaliação do desempenho das previsões por conjunto foram selecionadas quatro medidas de desempenho: o Diagrama de Dispersão (DD), o Spread-Bias Diagram (SBD), o Diagrama ROC e o Brier Skill Score (BSS). Para o caso das três primeiras medidas de desempenho citadas os resultados são apresentados para as antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h.

A Figura 91 apresenta o DD da previsão por conjunto, onde são graficados os pares de vazão observada *versus* previstas para todos os membros do conjunto nas antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h. Nesse gráfico, para cada valor de vazão observado, tem-se n pares (observação; previsão) - onde n é o número de membros do conjunto. Observa-se, predominantemente, uma superestimativa das previsões. Com o aumento da antecedência, os desvios aumentam, e assim, as superestimativas, sobretudo para vazões observadas acima de $600\text{m}^3/\text{s}$.

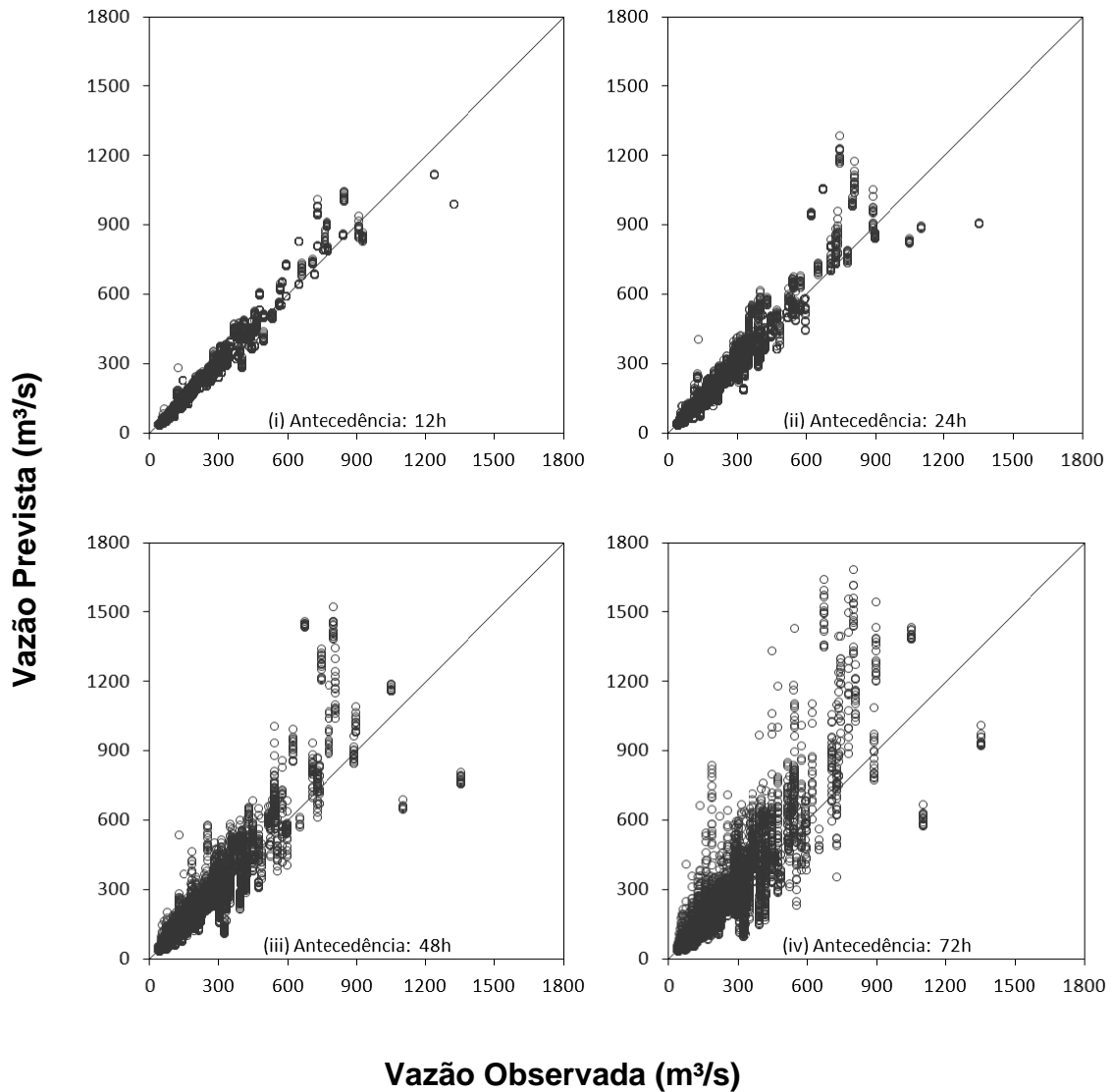


Figura 91. Diagrama de Dispersão da previsão por conjunto para as antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h.

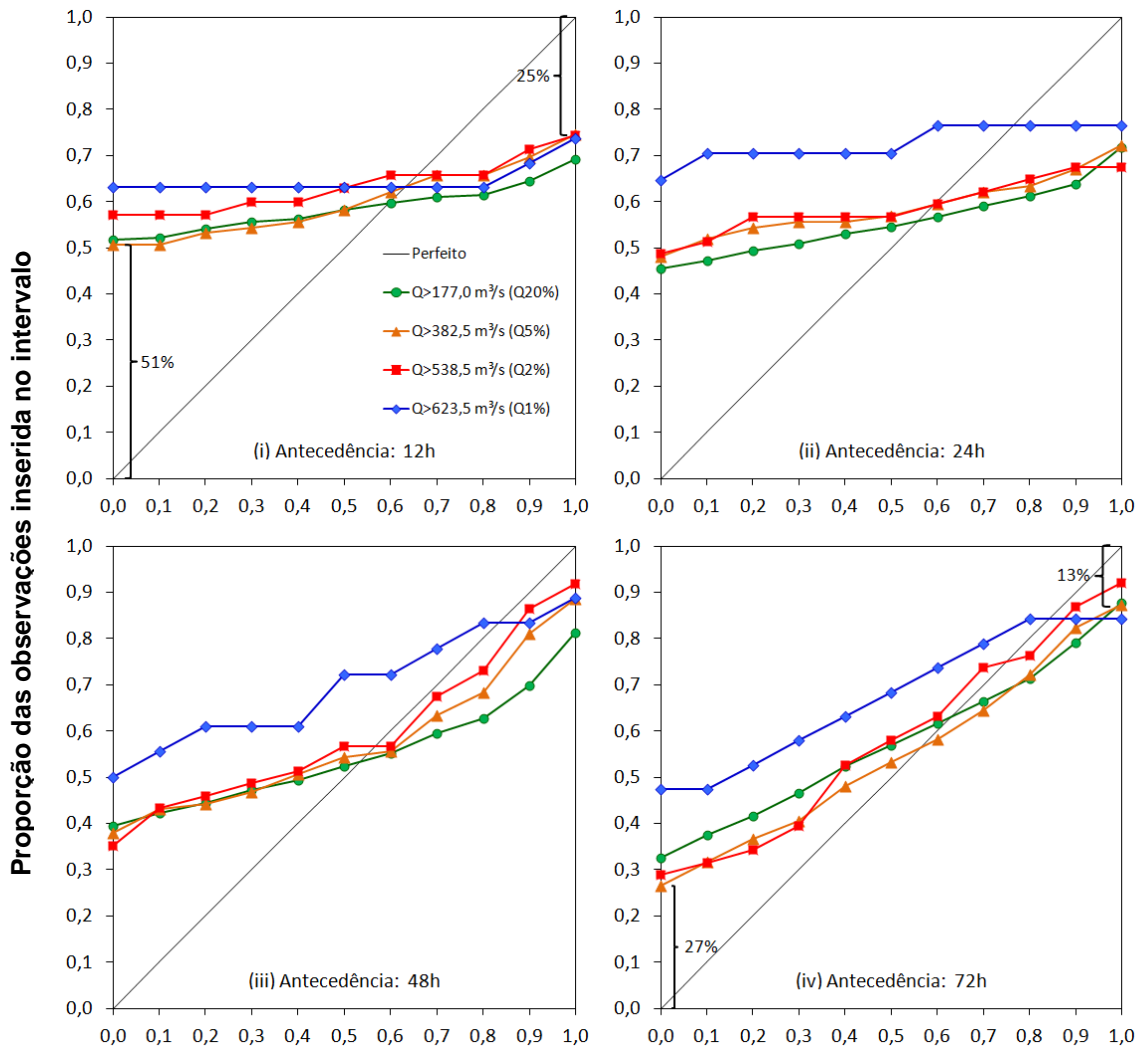
O SBD fornece subsídios para avaliação do espalhamento e de erros sistemáticos da previsão por conjunto (vide item 2.5.2.2). O diagrama apresenta, para um conjunto de previsões realizadas, a proporção de observações inseridas em intervalos fixos da distribuição do conjunto (intervalos interdecis). Um espalhamento perfeito é obtido quando a linha que une os pares (intervalo da distribuição prevista; proporção da observação inserida no intervalo) se coloca sobre a diagonal do diagrama.

A Figura 92 apresenta o SBD para as previsões hidrológicas por conjunto para as antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h. A Figura 92(i) apresenta o diagrama para a antecedência de 12h. Tomando como exemplo o SBD para faixas de magnitude de vazões observadas maiores que a Q5%, representado pela linha que une os triângulos em cor laranja, observa-se uma inclinação em relação à horizontal menor que 45%, indicando um subespalhamento do conjunto. Nessa

antecedência a maior parte das observações se concentra abaixo ou acima dos extremos da distribuição da previsão. O encontro da linha com o eixo das ordenadas à esquerda do diagrama, dado pelo par (0;0,51), indica que 51% das observações ficam totalmente abaixo do limite inferior (mínimo valor) do conjunto e não são captadas pelo conjunto. O encontro da linha com o eixo das ordenadas à direita (1;0,74), por sua vez, indica que 26% das observações se colocam acima do limite superior do conjunto (máximo valor), também não sendo captadas pelo espalhamento do conjunto. Dessa forma, somente 23% das observações são captadas pelo conjunto para essa antecedência e faixa de magnitude de vazões, havendo, predominantemente, uma superestimativa das previsões. Para que o conjunto tivesse um espalhamento mais confiável, deveriam existir mais membros abaixo e acima dos limites inferiores e superiores do conjunto atual. Para as demais faixas de magnitude de vazões o conjunto apresenta resultados semelhantes, nessa antecedência.

Com aumento da antecedência, o espalhamento do conjunto aumenta, assim como sua confiabilidade. Considerando novamente faixas de magnitude de vazões maiores que a Q5%, nas antecedências de 24h e 48h (Figura 92 (ii) e (iii)) o conjunto capta, respectivamente, 24% e 51% das vazões observadas, estando, novamente, grande parte das observações concentradas abaixo do extremo inferior do conjunto.

A previsão por conjunto apresenta espalhamento máximo na antecedência de 72h (Figura 92 (iv)), sendo que as linhas que unem os pares no gráfico se colocam mais próximas à linha de 45°, indicando um aumento da confiabilidade das previsões. Nessa antecedência o conjunto capta 60% das observações para faixas de magnitude de vazões observadas maiores que a Q5%, sendo que cerca de 27% das observações ficam abaixo do limite inferior e 13% ficam acima do limite superior do conjunto. Para as demais faixas de magnitude de vazão analisadas os resultados são semelhantes para essa mesma antecedência, com exceção daqueles relacionados a vazões acima da Q1%, onde os percentuais captados pela distribuição do conjunto são visivelmente menores. A baixa confiabilidade das previsões por conjunto para essa faixa de magnitude de vazões (Q1%) tem forte relação com as previsões realizadas durante o final de dez/2008 e início de jan/2009 (vide Figura 81), onde foram observados erros importantes nas previsões, como previamente comentado. A tendência de aumento da proporção de observações captadas no intervalo entre os limites máximo e mínimo da distribuição da previsão com o aumento da antecedência é mostrada na Figura 93.



Intervalo ou janela da distribuição prevista (probabilidade de não-excedência)

Figura 92. SBD para a previsão por conjunto nas antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h.

Em resumo, os resultados da análise com o SBD indicaram a existência, preponderantemente, de uma superestimativa e um subespalhamento das previsões por conjunto, especialmente nas antecedências iniciais do horizonte de previsão, problemas tipicamente relatados na literatura (e.g. Velázquez et al. 2009, Hou et al., 2009; 2011; Boucher et al., 2011; Alfieri et al; 2012). Uma das alternativas para melhorar a confiabilidade das previsões é a utilização de abordagens que considerem outras fontes de incerteza nas previsões, tais como incertezas nas condições iniciais do modelo hidrológico ou em sua estrutura/parâmetros, ou ainda o uso de métodos de pré-processamento nos dados de entrada ou pós-processamento no resultado das previsões. Trabalhos recentes têm mostrado que é possível obter uma melhora nos resultados com a aplicação desses tipos de técnicas (e.g. Velázquez et al. 2009; Boucher et al., 2011; Andel et al. 2012; Zalachori et al., 2012).

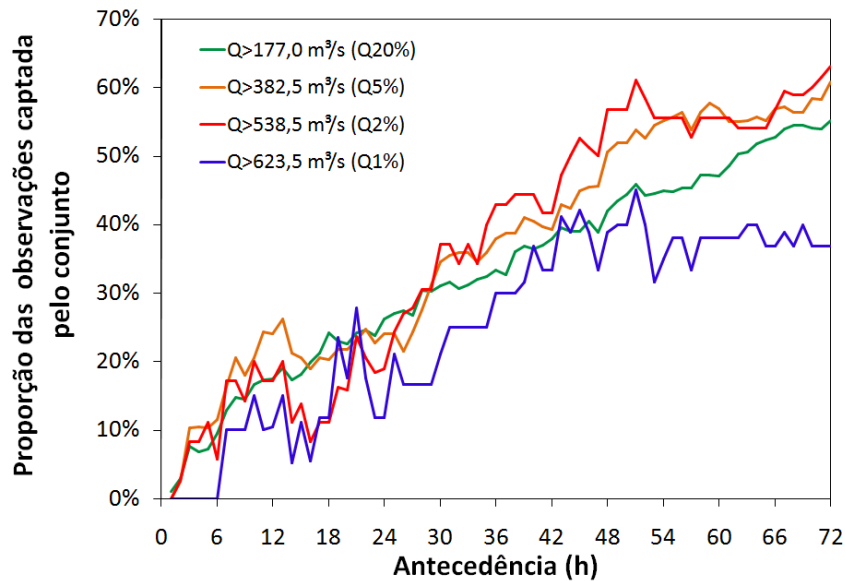


Figura 93. Proporção das observações captadas no intervalo [0,1] da distribuição da previsão para diferentes faixas de magnitude de vazões.

O Diagrama ROC mede o desempenho de um sistema de previsão na emissão de alertas para previsões de eventos do tipo dicótomos. No diagrama, são plotados os pares (Probabilidade de Detecção-POD; Probabilidade de Falsa Detecção ou Taxa de Alarme Falso – POFD) obtidos a partir de tabelas de contingência 2x2 para as previsões avaliadas. No eixo das ordenadas é apresentado POD, que representa a proporção de eventos corretamente previstos quando o evento ocorreu. No eixo das abscissas é apresentado POFD, que representa a proporção de eventos previstos pelo modelo quando os eventos não ocorreram. No caso das previsões por conjunto, são usados para representar a distribuição de probabilidades da previsão o 1º, 5º e o 9º decis. As previsões determinísticas - o conjunto médio e a previsão MSMES-H - são representadas apenas por um par (POD, POFD) no diagrama.

A Figura 94, a Figura 95, a Figura 96 e a Figura 97 apresentam o Diagrama ROC, para as antecedências de, respectivamente, 12h, 24h, 48h e 72h, para as diferentes vazões limites consideradas. Nessas figuras, os quadrados superior, intermediário e inferior no diagrama indicam, nessa ordem, o 9º, 5º e o 1º decil da distribuição da previsão por conjunto. Os pontos em vermelho e preto representam, respectivamente, as previsões determinísticas dadas pelo conjunto médio e pela previsão MSMES-H. A Tabela 25 no Anexo 6 apresenta os valores de POD e POFD para as previsões apresentadas na Figura 94, na Figura 95, na Figura 96 e na Figura 97.

Na Figura 94 é apresentado o Diagrama ROC para a antecedência de 12h. Com exceção do limite representado pela Q20%, mostrado na Figura 90(i), pode-se observar que todas as previsões se sobrepõem no diagrama, não sendo possível distinguir benefício em termos de POD ou POFD

pelo uso de uma previsão específica. Isso ocorre devido similaridade das previsões nessa antecedência, derivado do subespalhamento do conjunto, como previamente comentado. Observa-se ainda, que independente da vazão limite considerada, todas as previsões nessa antecedência apresentam valores de POD maiores ou iguais a 0,90 e de POFD menores que 0,06, considerado um bom resultado (e.g. Komma et al, 2007; Thirel et al., 2010). Os bons resultados nessa antecedência devem-se, sobretudo, ao efeito positivo do método de assimilação de dados de vazão.

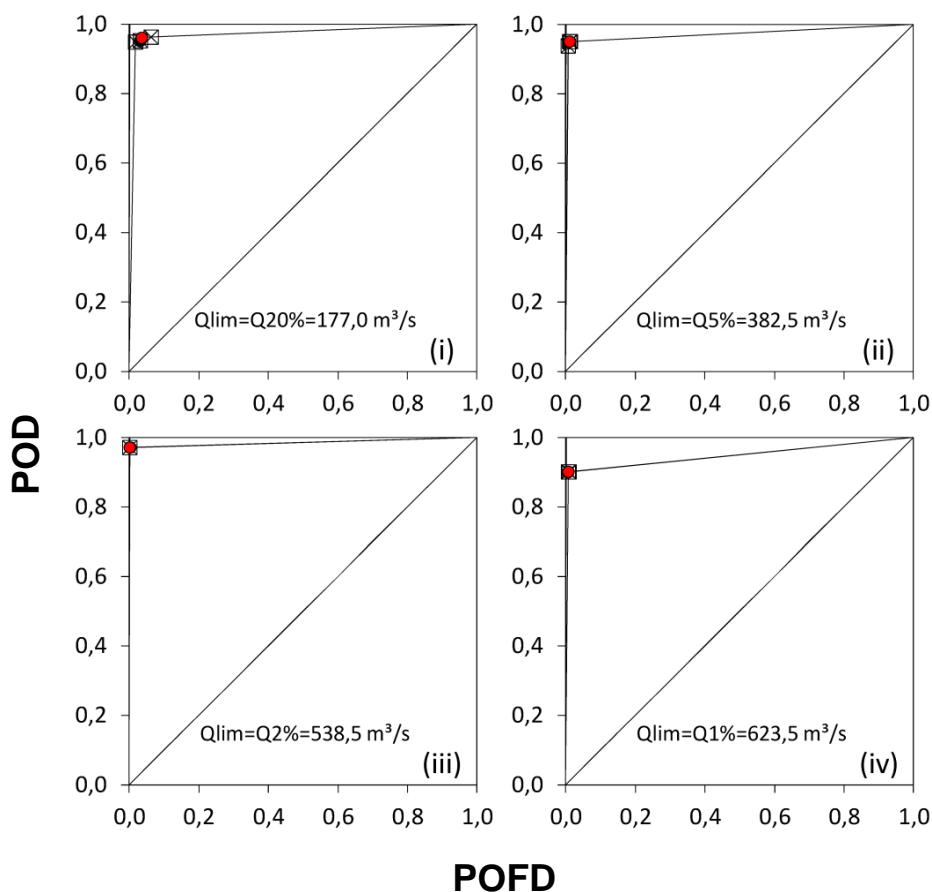


Figura 94. Diagrama ROC para as previsões por conjunto e para as previsões determinísticas – MSMES-H e o conjunto médio - na antecedência de 12h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam, respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis. Os pontos em preto e vermelho representam, respectivamente, a previsão MSMES-H e o conjunto médio.

Na antecedência de 24h, há um aumento do espalhamento do conjunto em relação a antecedência de 12h (vide Figura 92 (ii)), o que permite distinguir os resultados do 1º, 5º e 9º decil no Diagrama ROC da Figura 95. Pode-se observar que, de modo geral, o 9º decil apresenta valores de POD ligeiramente maiores que o 1º e 5º decil do conjunto e mesmo as previsões determinísticas, mantendo valores semelhantes aos dessas previsões em termos de POFD.

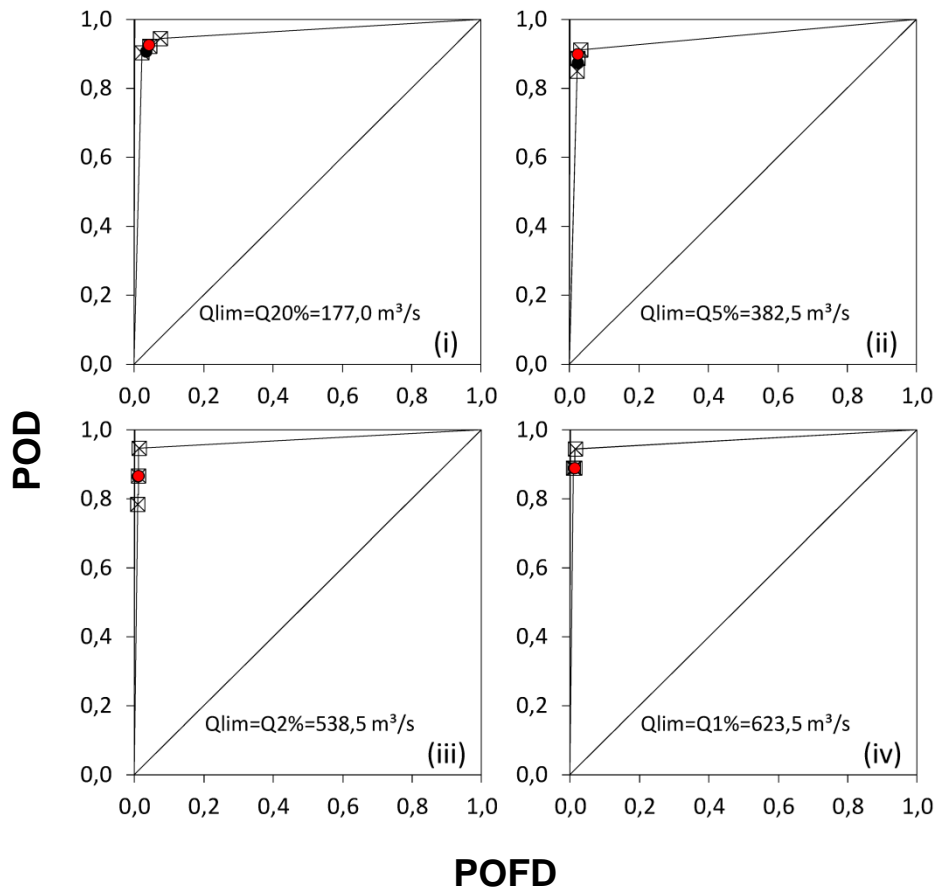


Figura 95. Diagrama ROC para as previsões por conjunto e para as previsões determinísticas – MSMES-H e o conjunto médio - na antecedência de 24h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam, respectivamente, o 1º, 5º e 9º decil. Os pontos em preto e vermelho representam, respectivamente, a previsão MSMES-H e o conjunto médio.

A partir da antecedência de 48h, a diferença nos resultados das previsões fica mais evidente. Tomando como exemplo a vazão limite de Q2% na antecedência de 48h, o 1º, 5º e 9º decil do conjunto apresentam valores de POD de 0,73, 0,81 e 0,97 para valores correspondentes de POFD de 0,01, 0,01 e 0,03. A previsão determinística MSMES-H apresenta valores de POD e POFD, respectivamente, de 0,73 e 0,01. Percebe-se, que a utilização de quantis superiores do conjunto, representados pelo 9º decil, permite aumentar POD de 0,73 da previsão MSMES-H para 0,97, em detrimento de um pequeno aumento do valor de POFD, de 0,01 para 0,03. A utilização do 9º decil mostra benefício em relação aos demais decis e mesmo sobre a média do conjunto. Para as previsões que consideram as demais vazões limites, a vantagem pelo uso do 9º decil se mantém, embora o benefício seja um pouco menor.

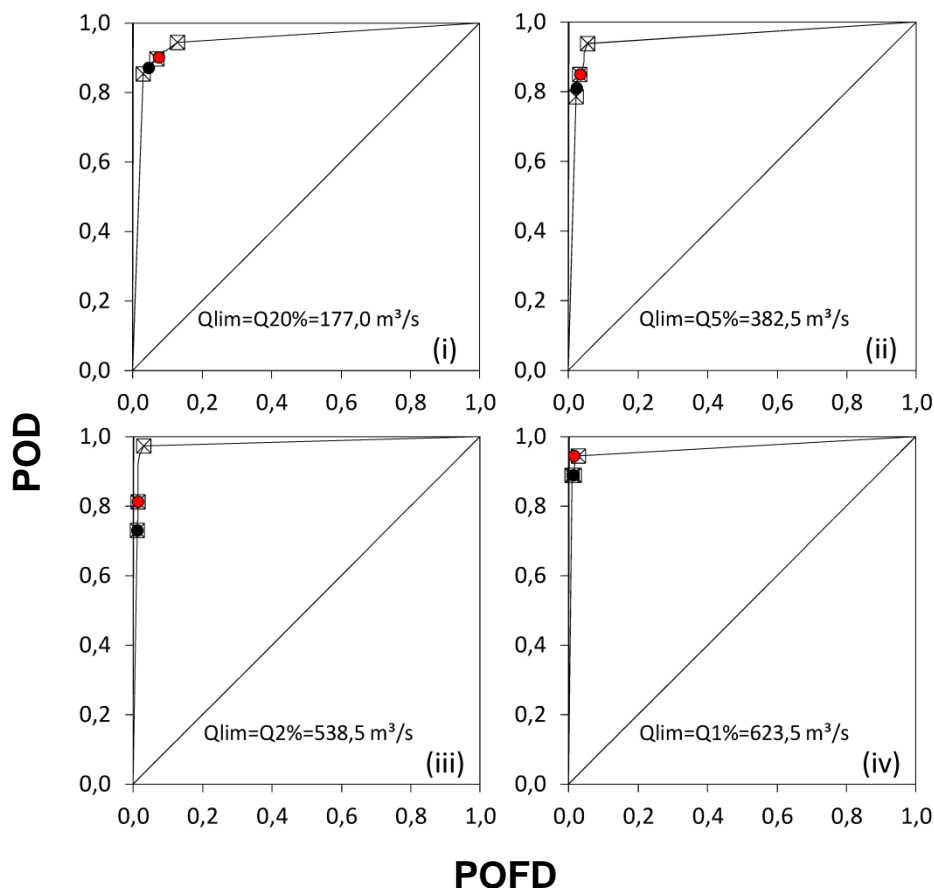


Figura 96. Diagrama ROC para as previsões por conjunto e para as previsões determinísticas – MSMES-H e o conjunto médio - na antecedência de 48h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam, respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis. Os pontos em preto e vermelho representam, respectivamente, a previsão MSMES-H e o conjunto médio.

Para a antecedência de 72h (Figura 97), a previsão por conjunto dada pelo 9º decil apresenta resultados superiores a todas outras previsões, particularmente para as vazões limites Q2% e Q1% (Figura 97(iii) e (iv)), consideradas mais importantes no contexto de prevenção de cheias. No caso das previsões que consideram a vazão limite Q2% (Figura 97(iii)), é possível aumentar os valores de POD de 0,61 da previsão MSMES-H para 0,95 com o uso no 9º decil da previsão por conjunto, em detrimento de um aumento de POFD de 0,01 para 0,05. De maneira análoga, para as previsões que consideram a Q1% como limite (Figura 97(iv)), é possível elevar o valor de POD de 0,79 para 0,95 com um aumento da taxa de alarmes falsos de 0,01 para 0,05.

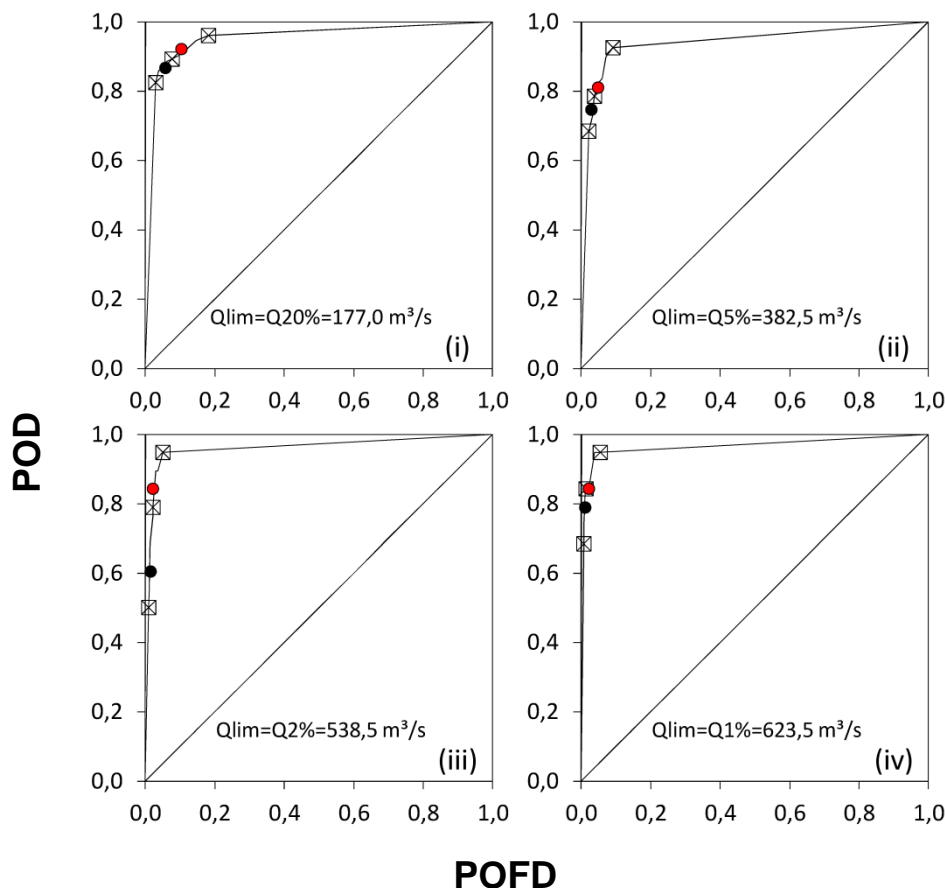


Figura 97. Diagrama ROC para as previsões por conjunto e para as previsões determinísticas – MSMES-H e o conjunto médio - na antecedência de 72h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam, respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis. Os pontos em preto e vermelho representam, respectivamente, a previsão MSMES-H e o conjunto médio.

Em resumo, têm-se das análises envolvendo o Diagrama ROC:

- Nas antecedências de até 24h, todas as previsões apresentam resultados similares, o que pode ser atribuído ao subespalhamento do conjunto nessas antecedências, mostrado nas análises com o SBD. Os bons resultados obtidos nessas antecedências podem ser atribuídos, sobretudo, ao efeito positivo do método de assimilação de dados de vazão;
- Para todas as antecedências e para as vazões limites Q2% e Q1%, consideradas mais importantes no contexto de prevenção de cheias, o ganho em termos de POD obtido pelo uso do 9º decil é igual ou superior ao ganho obtido em termos de POFD pelo uso dos demais decis analisados (1º e 5º decis), da média do conjunto e também sobre a previsão determinística de referência. A previsão dada pelo 9º decil do conjunto poderia, por exemplo, ser utilizada como parâmetro na emissão de alertas de cheia;
- Em todas as situações avaliadas, o 9º decil do conjunto apresentou bons resultados, com valores de POD maiores ou iguais a 0,90 e valores de POFD inferiores a 0,20.

A Figura 98, apresenta os resultados das análises das previsões por conjunto através do Brier Skill Score-BSS. Esse índice mostra ganho em termos de Brier Score da previsão por conjunto em relação a previsão MSMES-H, considerada como referência. Um melhor desempenho da previsão de referência em termos de Brier Score é obtido quando o índice assume valores menores que zero. Para valores maiores que zero, a previsão por conjunto possui melhor desempenho. Ao lado da legenda da Figura 98, indicado pela sigla BSSm, aparecem os valores médios de BSS ao longo de todo horizonte de previsão, para cada uma das vazões limites.

Observa-se, que até a antecedência de 18h os valores de BSS para as diferentes vazões limites se alternam entre positivos e negativos. A partir dessa antecedência, para todas as vazões limites com exceção da Q1%, o valor do índice é positivo, indicando superioridade da previsão por conjunto sobre a previsão determinística MSMES-H. No caso da Q1%, embora na maior parte das antecedências os valores de BSS sejam negativos, o valor de BSS médio ao longo do horizonte é bastante próximo de zero, indicando que, em média, os resultados das duas estimativas são similares. Na antecedência de 72h, a previsão por conjunto é superior a previsão MSMES-H para todas as vazões limites.

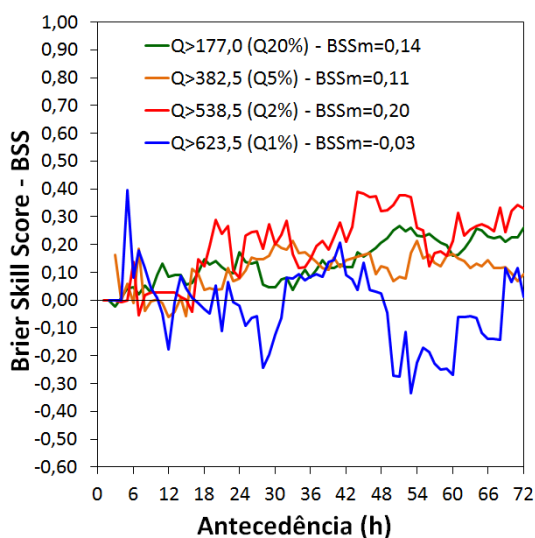


Figura 98. Resultados da previsão por conjunto em termos do Brier Skill Score tendo como referência a previsão MSMES-H. BSSm representa o valor médio de BSS entre todas as antecedências do horizonte de previsão.

7.2.3.5 Análise das previsões na forma de diagramas de excedência

Nesse item são apresentados os resultados das previsões MSMES-H e por conjunto através do Diagrama de Excedência, para alguns dos principais eventos hidrológicos ocorridos nos períodos chuvosos (out-abr) entre os anos de 2008 e 2011. As análises dos diagramas são focadas na superação das maiores vazões limites ocorridas em cada um dos períodos analisados.

1º Período: 14/12/2008 a 02/01/2009

Nesse período ocorreram os dois maiores eventos de cheia entre 2008 e 2011, com períodos de retorno estimados de 46,1 e 3,5 anos. Ao longo da janela de 20 dias de previsões considerada no diagrama (14/12/2008 a 02/01/2009), a vazão limite Q1% é superada durante dois intervalos, sendo o primeiro entre os dias 20 e 25/12/2008, e o segundo, entre os dias 29/12/2008 e 05/01/2009. A Figura 99 e a Figura 100 apresentam, respectivamente, os Diagramas de Excedência para as previsões MSMES-H e para a previsão por conjunto.

Nas previsões realizadas nos dias 18 e 19/12/2008, mostradas no diagrama da Figura 99, a previsão MSMES-H indica corretamente a superação da Q1%, entretanto com um adiantamento no tempo de cerca de 24h. A previsão por conjunto, mostrada no diagrama da Figura 100, apresenta comportamento similar, indicando probabilidade de 100% de superação da Q1%, com 24h de adiantamento. Nas previsões a partir do dia 22/12/2008, tanto a previsão por conjunto como a previsão MSMES-H indicam o restabelecimento de vazões inferiores a Q1%, ocorrida nas primeiras 12h do dia 25/12/2008, mas com um adiantamento no tempo de 12h.

No segundo evento do período, a previsão determinística realizada nos dias 27 e 28/12/2008 prevê com um atraso de 12h a superação da Q1% nas primeiras 12h do dia 29/12/2008. A previsão por conjunto, por outro lado, capta corretamente, na previsão do dia 27/12/2008, a superação da Q1% nas primeiras 12h do dia 29/12/2008, mostrando uma probabilidade de 18%, com 48h de antecedência. Na previsão do dia 28/12/2008, o conjunto indica uma probabilidade de 44% da superação da Q1% nas primeiras 12h do dia 29/12/2008, mostrando ligeira superioridade sobre a previsão determinística, que não detecta a superação nesse intervalo de tempo. Nos dias de previsão restantes, tanto a previsão determinística como a por conjunto preveem persistentemente a superação da Q1%, como observado. Para o período ora avaliado, a análise dos resultados através do Diagrama de Excedência mostra que o desempenho das previsões MSMES-H e por conjunto são similares, existindo benefício pelo uso da previsão por conjunto em algumas situações. Embora tenham sido observados erros significativos nas previsões dos hidrogramas para esse período (vide Figura 81), os diagramas mostram que as previsões em termos da superação das vazões limites são razoáveis, apresentando utilidade na tomada de decisão sobre a emissão de alertas.

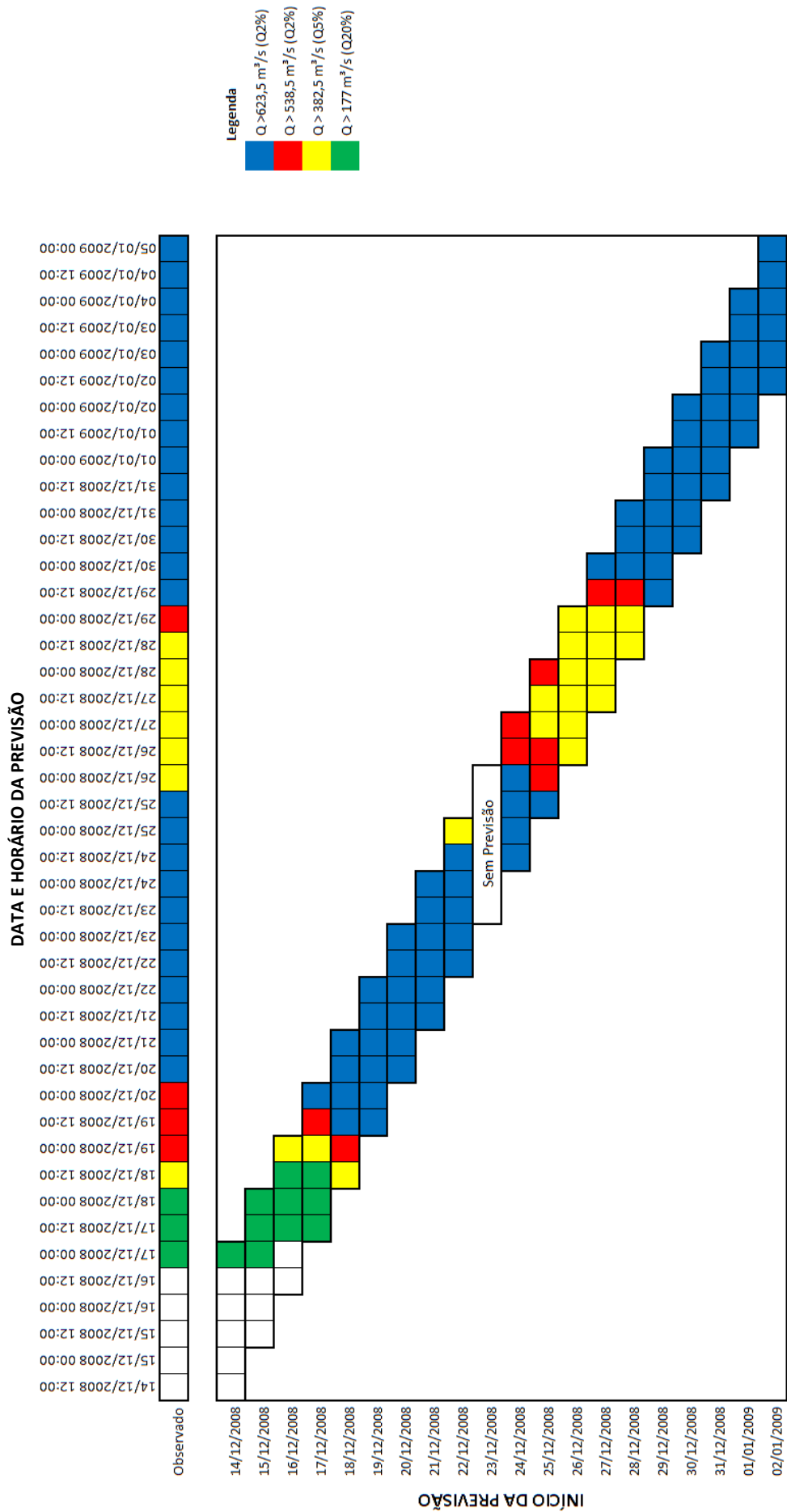


Figura 99. Diagrama de Excedência para a previsão determinística MSMES-H no período entre 14/12/2008 e 02/01/2009.

2º Período: 25/12/2010 a 13/01/2011

O segundo período analisado compreende o terceiro maior evento observado entre 2008-2011. Durante a ocorrência desse evento, a Q1% é superada durante dois intervalos: o primeiro, entre os dias 31/12/2010 e 02/01/2011, e o segundo, entre os dias 06/01/2011 e 08/01/2011. A Figura 101 e a Figura 102 apresentam, respectivamente, os Diagramas de Excedência para as previsões MSMES-H e por conjunto.

Considerando que as previsões possuem horizonte de 72h, a partir da previsão iniciada no dia 29/12/2010 já seria possível detectar a superação da Q1%, observada nas primeiras 12h do dia 31/12/2010. Como se observa na Figura 101, que a previsão MSMES-H não indica a superação da Q1% nas previsões dos dias 29, 30 e 31/12/2010. Somente na previsão do dia 01/01/2010, já durante a ocorrência do primeiro período em que há superação da Q1%, há indicação da superação dessa vazão limite pela MSMES-H. No caso da previsão por conjunto (Figura 102), já a partir do dia 29/12/2010, com 48h de antecedência, é indicada a superação da Q1% ocorrida nos dias 31/12/2010 e 01/01/2011 com probabilidades de ocorrência entre 26 e 29%. Nos dois dias seguintes de previsão (30 e 31/12/2010), a previsão por conjunto persiste corretamente na indicação da superação da Q1%, apresentando probabilidades de ocorrência de até 37%, entretanto com um atraso de 12h.

Durante o segundo intervalo no qual as vazões superam a Q1%, entre os dias 06 e 08/01/2011, as previsões determinística e por conjunto apresentam resultados similares, sendo a superação da Q1% prevista com um adiantamento de cerca de 48h pelas duas previsões, como mostrado na previsão do dia 03/01/2011. Na sucessão do evento, as duas previsões detectam bem a superação da Q1%, incluindo o restabelecimento de vazões inferiores a Q1%, ocorrido nas últimas doze horas do dia 08/01/2011.

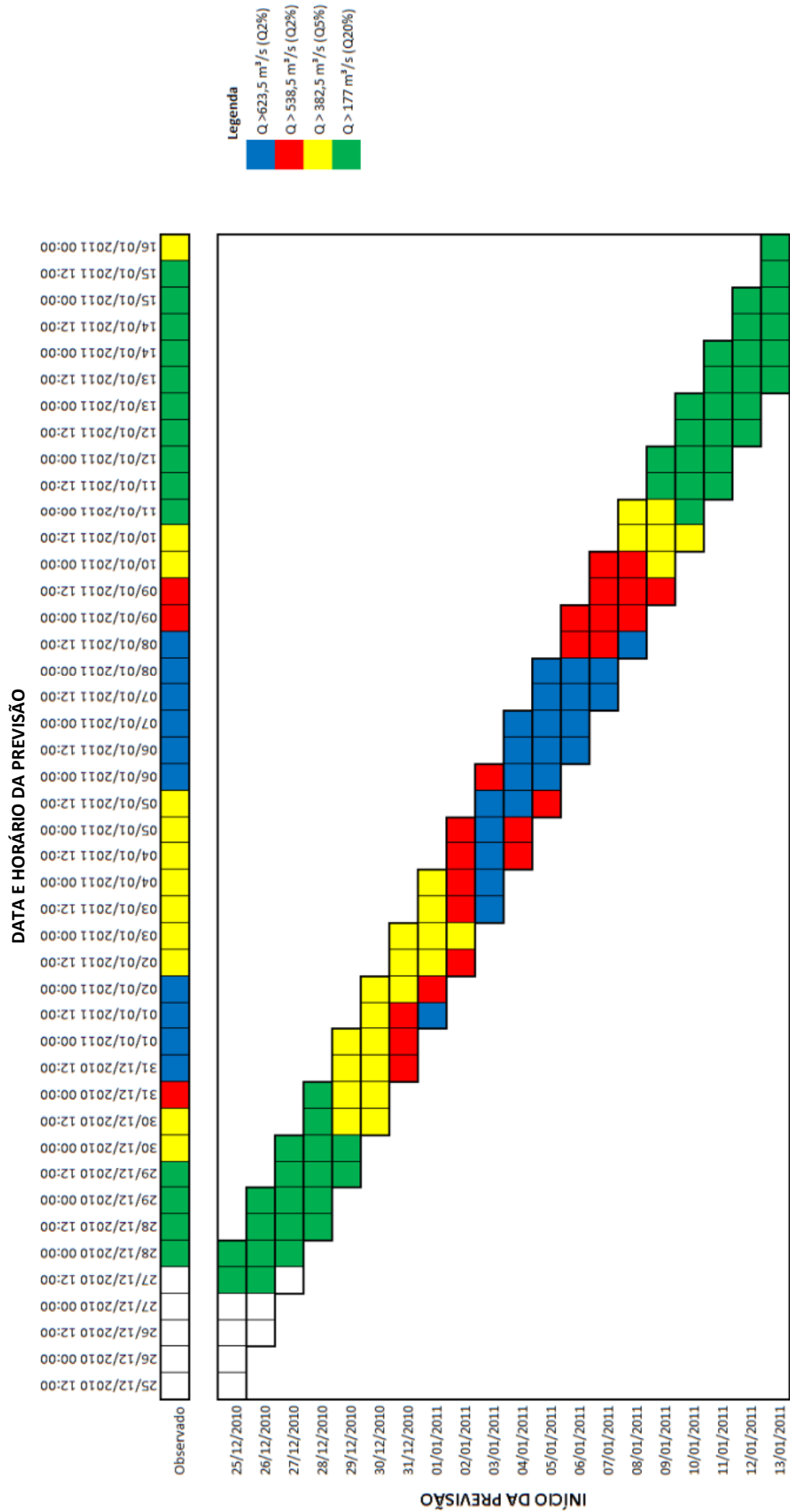


Figura 101. Diagrama de Excedência para a previsão determinística MSMES-H no período entre 25/12/2010 e 13/01/2011.

3º Período: 10/01/2011 a 29/01/2011

No evento ocorrido durante esse período, as vazões atingiram níveis superiores a Q2% entre os dias 17 e 19/01/2011. Os Diagramas de Excedência para as previsões MSMES-H e por conjunto são apresentados, respectivamente, na Figura 103 e na Figura 104.

Nesse período, a partir da previsão realizada no dia 14/01/2011, já seria possível prever a superação da Q2% ocorridas nas últimas 12h do dia 16/01/2011. No caso da previsão MSMES-H, somente na previsão do dia 16/01/2011, 12h antes da ocorrência da superação da Q2%, existe a indicação. Observa-se ainda que o restabelecimento de níveis inferiores a Q2% é postergado nas previsões determinísticas iniciadas nos dias 17 e 18/01/2011. Nessas duas previsões, são indicados níveis superiores a Q2% para o dia 19/12/2011, embora as vazões observadas já tenham retomado níveis inferiores à Q2% nas últimas 12h do dia 18/01/2011.

O diagrama da previsão por conjunto, mostrado na Figura 104, indica já na previsão do dia 14/12/2011, com cerca de 60h de antecedência, a superação da Q2% com probabilidade de ocorrência de 38%. Na previsão iniciada no dia 15/11/2011, com cerca de 24h de antecedência, existe um indício mais consistente da ocorrência da superação da Q2%, com probabilidades de ocorrência entre 37 e 80%. Na previsão do dia 16/11/2011, que engloba todo o intervalo em que foi superada a Q2%, o modelo indica precisamente no tempo, com probabilidades entre 85% e 100%, a possibilidade de ocorrência da superação. No restabelecimento de valores inferiores a Q2%, ocorrido nas últimas 12h do dia 18/01/2011, o conjunto indica probabilidades menores de superação da Q2%, entretanto com um atraso de cerca de 24h.

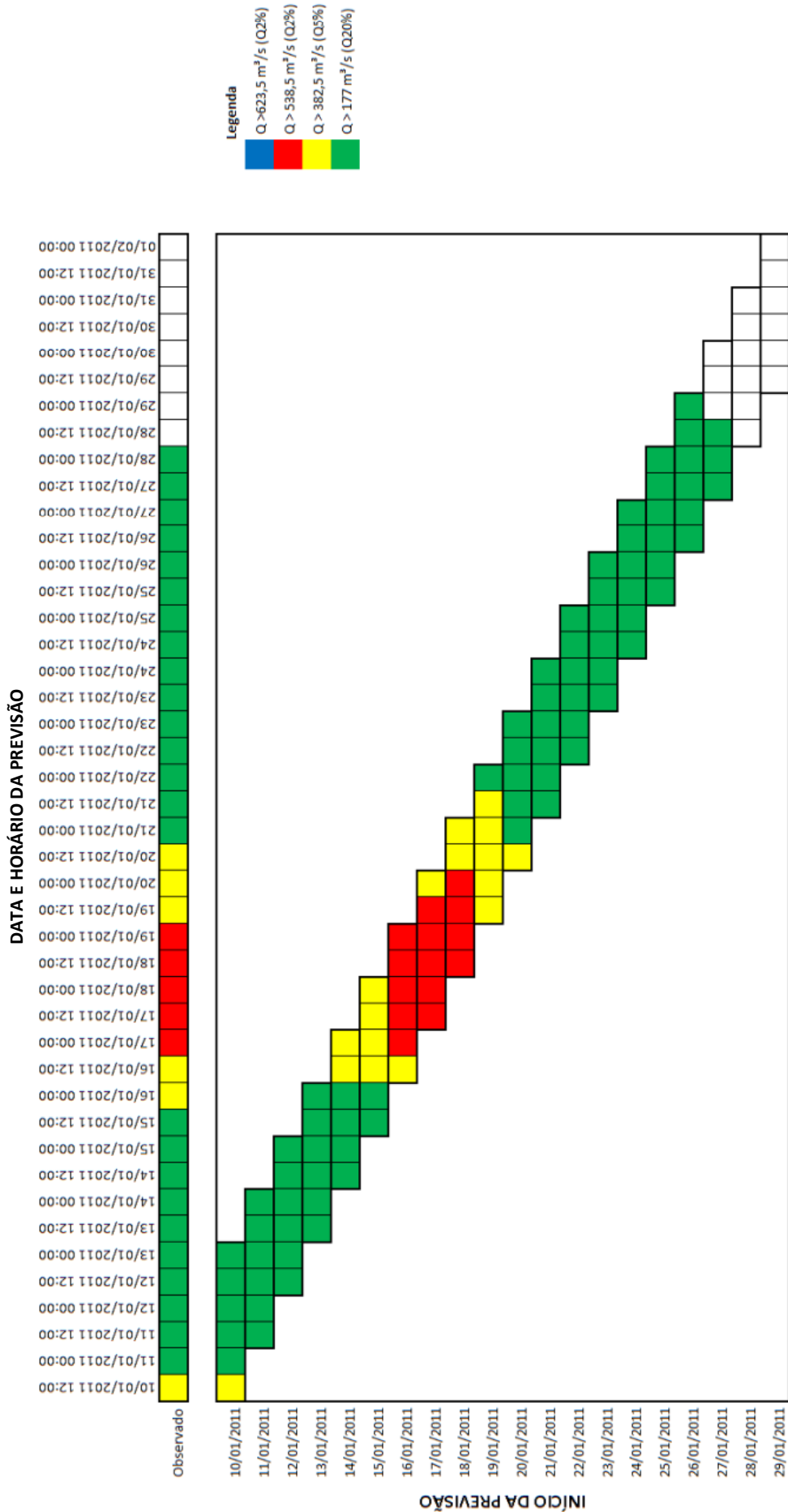


Figura 103. Diagrama de Excedência para a previsão determinística MSMEs-H no período entre 10/01/2011 e 29/01/2011.

4º Período: 01/03/2011 a 20/03/2011

O quarto período analisado apresenta o evento ocorrido durante o mês de março de 2011. Durante esse evento as vazões na estação Porto do Mesquita superaram a Q2% entre os dias 08 e 11/03/2012, atingindo cerca de 610 m³/s. Na Figura 105, onde é apresentado o diagrama para a previsão MSMES-H, observa-se que somente na previsão do dia 07/03/2011, com 48h de antecedência, é indicada a superação da Q2%. Na previsão iniciada no dia seguinte (08/03/2011) não há persistência na indicação de superação da Q2%, tendo sido previstos somente a superação da Q5%. Nas previsões dos dias 09 e 10/03/2011, a previsão determinística volta a prever corretamente a superação da Q2% e mesmo o restabelecimento de níveis inferiores a Q2%, ocorrido nas últimas 12h do dia 11/03/2011.

O diagrama da previsão por conjunto, mostrado na Figura 106, indica com 5% de probabilidade a superação da Q2%, com 72h de antecedência, na previsão iniciada no dia 06/03/2011. Nas previsões realizadas nos dias 07, 08, 09 e 10/03/2011, a indicação de superação da Q2% persiste, aumentando, de modo geral, as probabilidades de ocorrência conforme o evento observado se aproxima no tempo. Nas primeiras 12h do dia 11/03/2011, o conjunto indica o restabelecimento de vazões inferiores a Q2%, mostrando probabilidades menores de superação da vazão limite Q2%.

7.2.4 Análise do impacto da redução do número de membros

Nesse item são apresentados os resultados da avaliação do impacto da redução do número de membros no desempenho das previsões por conjunto. No método proposto, foram excluídos, aleatoriamente, para cada evento de previsão ao longo dos três períodos chuvosos (out-abr) entre 01/10/2008 a 31/04/2011, 50% e 75% dos membros. Esse ciclo foi repetido 1000 vezes. Para análise dos resultados foi utilizado o Brier Skill Score-BSS, considerando as quatro vazões limites (Q20%, Q5%, Q2% e Q1%). A previsão utilizada como referência no cálculo do BSS para cada um dos conjuntos com redução de membros foi o conjunto com todos os membros disponíveis.

A Figura 107 apresenta os resultados em termos do BSS para os conjuntos com 50% e 25% dos membros. As linhas mais espessas nas cores vermelho e azul representam os valores médios de BSS para as 1000 realizações com reduções de, respectivamente, 50 e 75% dos membros do conjunto. De maneira análoga, as linhas delgadas em vermelho e azul representam os quantis de 10% e 90% dos valores de BSS para as 1000 realizações nos cenários com redução de membros. Valores negativos do BSS indicam que a previsão avaliada possui desempenho inferior à previsão de referência, representada pelo conjunto com todos os membros. Valores positivos de BSS indicam que os conjuntos com redução de membros possuem melhor desempenho.

Observa-se na Figura 107, que, independente da redução do número de membros aplicada, o valor médio de BSS para praticamente todas as antecedências e vazões limites consideradas apresentam valores negativos. Isso significa que, em média, conjuntos com 50 e 25% dos membros apresentam desempenho inferior à previsão que considera todos os membros, sendo que o conjunto com 25% dos membros possui desempenho inferior ao conjunto com 50% dos membros. Para a antecedência de 72h e para a vazão limite Q1% (Figura 107(iv)), por exemplo, a previsão com 50% dos membros apresenta, em média, desempenho cerca de 4% inferior ao do conjunto com todos os membros. A previsão com 25% dos membros, para essa mesma antecedência e vazão limite, apresenta desempenho cerca de 12% inferior ao do conjunto com todos os membros. A superioridade relativa da previsão com 50% membros sobre a previsão com 25% dos membros se repete para as demais antecedências e vazões limites. Pode-se observar ainda a existência de uma tendência de diminuição do desempenho dos conjuntos com redução do número de membros em relação ao conjunto completo, com o aumento da antecedência.

Os resultados obtidos mostram que previsões com um maior número de membros apresentam, em média, melhores resultados que conjuntos menores. A diminuição do conjunto é, de certa forma, desejável já que o custo computacional da previsão meteorológica acoplada a hidrológica com um grande número de membros é dispendiosa. Alguns trabalhos apresentam técnicas de agrupamento para seleção dos membros mais representativos, obtendo resultados com desempenho melhor ou similar que o conjunto com todos os membros (e.g. Verbunt, 2007; Brochero et al. 2011; Jaun et al., 2008). Nessa pesquisa esse tipo de avaliação não foi viável,

devido à variação do número de membros do conjunto entre eventos de previsão. Entretanto, os valores positivos da banda de incerteza nos gráficos da Figura 107, especialmente para previsões com redução de 50% dos membros (na cor vermelha), refletem o benefício potencial que poderia ser obtido pelo uso da técnica de seleção de membros.

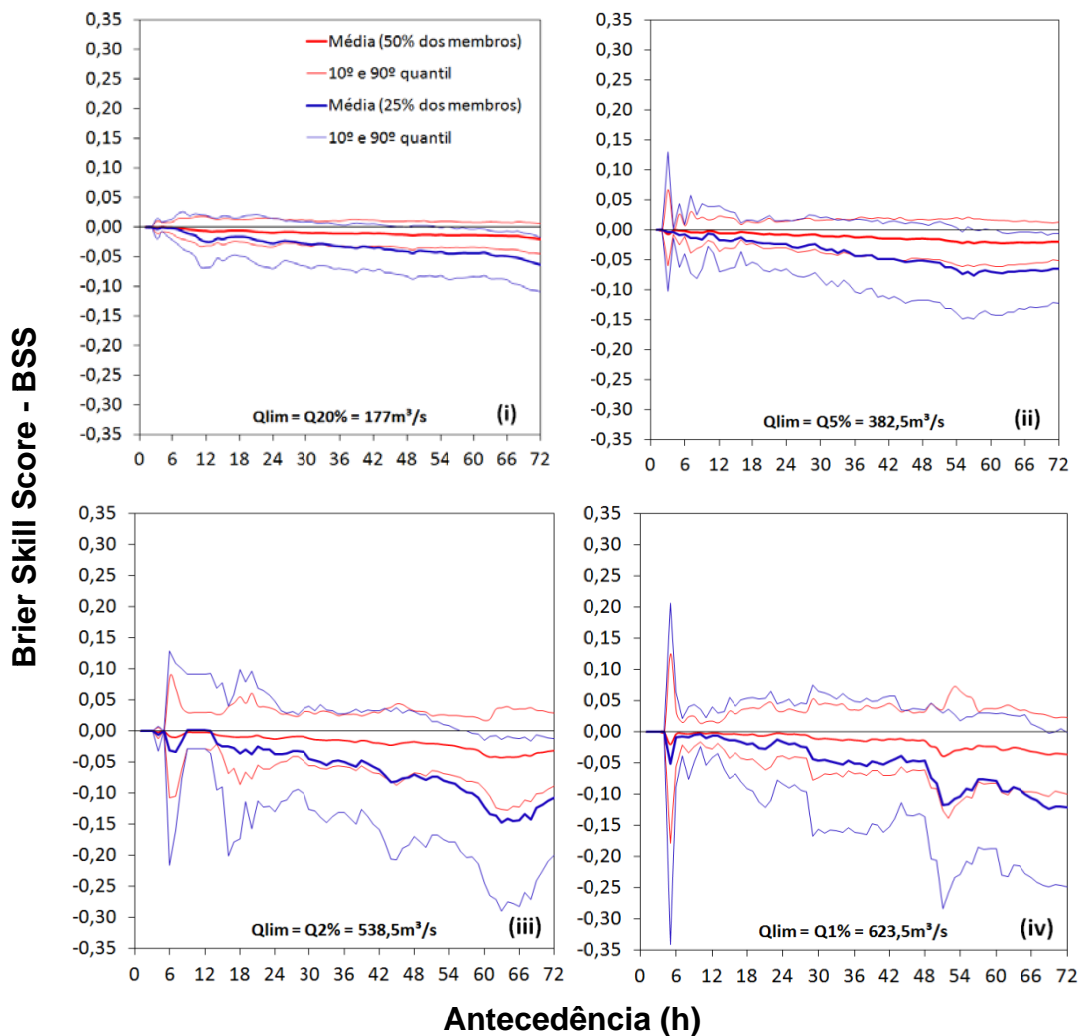


Figura 107. Média e quantis de 10% e 90% dos valores do Brier Skill Score para os conjuntos com 50% dos membros (linhas vermelho) e 25% dos membros (linhas em azul), para as 1000 realizações.

Capítulo 8

Conclusões e Recomendações

Essa pesquisa teve como objetivo principal avaliar o benefício da incorporação da previsão meteorológica por conjunto à modelagem chuva-vazão conceitual na previsão de cheias em curto prazo, utilizando ferramentas e dados disponíveis em modo operacional no Brasil. Como estudo de caso foi utilizada a bacia do rio Paraopeba, uma bacia de médio porte (12.150km²) localizada na região sudeste do Brasil, de clima tipicamente tropical. A seção de medição utilizada para avaliação dos resultados das previsões foi a da estação fluviométrica Porto do Mesquita, que possui histórico de dados horários de vazão com extensão de mais de 10 anos. Para se atingir o objetivo principal, diversas atividades e análises secundárias foram realizadas. Nos itens a seguir, são apresentadas as principais conclusões pertinentes a cada uma dessas atividades.

8.1 Modelagem hidrológica

Na aplicação do modelo MGB-IPH, a bacia do Rio Paraopeba foi discretizada em 53 trechos de rio e 55 minibacias, com áreas entre 0,55km² e 692,57km². O intervalo de tempo adotado na simulação hidrológica foi de uma hora. A calibração e validação do modelo foi efetuada nas sub-bacias correspondentes as seções de medição das estações fluviométricas Ponte Nova do Paraopeba (5.774km²) e Porto do Mesquita (10.280km²). Foram obtidos resultados satisfatórios nas duas estações nestes procedimentos, com Coeficientes de Eficiência de Nash-Sutcliffe-NS superiores a 0,76 e erros de volume (ΔV), em módulo, menores que 12%.

De modo geral, tanto os picos como as estiagens dos hidrogramas simulados foram bem representadas pelo modelo. Na simulação de alguns eventos, entretanto, observou-se a ocorrência de defasagem importante no tempo entre os hidrogramas observados e calculados. Entre os possíveis fatores associados a essa questão, podem ser citados: (a) representação espacial deficiente do campo de chuva na bacia, devido à baixa densidade de postos pluviométricos dentro dos limites da bacia; e (b) possíveis efeitos de reservatórios na bacia ou da planície de inundação na propagação do escoamento, desconsiderados na aplicação do modelo.

8.2 Previsão de cheias

Para geração das previsões de cheia na bacia, o modelo hidrológico MGB-IPH foi alimentado com a variável precipitação de um conjunto de previsões meteorológicas, que incluem

saídas de diferentes modelos meteorológicos que integram a base de dados do Laboratório MASTER (IAG-USP). Foi utilizada ainda, como parâmetro de referência nas análises, uma previsão hidrológica única, obtida a partir do uso de uma previsão de precipitação resultante da combinação estatística de saídas de diferentes modelos meteorológicos, denominada MSMES-M.

8.2.1 Previsão de precipitação

As avaliações do desempenho das previsões de precipitação foram realizadas para os três períodos chuvosos (out-abr) compreendidos entre os anos 2008 e 2011. As estimativas avaliadas nesse procedimento foram a previsão determinística de referência MSMES-M e a média do conjunto meteorológico.

O desempenho das previsões foi investigado sob dois aspectos distintos: (a) discernimento sobre a ocorrência ou não do evento de precipitação e, (b) a quantidade de precipitação ocorrida. Com relação ao desempenho das previsões em (a), as estimativas MSMES-M e a média do conjunto mostraram desempenhos similares, alternando-se como melhor estimativa a depender da medida de desempenho e da antecedência da previsão.

Na avaliação do desempenho das previsões em relação ao item (b), observou-se que as duas previsões subestimam a magnitude da precipitação em todas as antecedências analisadas. As subestimativas de ambas as previsões aumentaram, de modo geral, com o aumento da intensidade e da antecedência, sendo que a estimativa MSMES-M subestimou menos as alturas de chuva que a média do conjunto, mostrando melhor desempenho.

8.2.2 Assimilação de dados de vazão

Para análise do método de assimilação de dados, foram realizadas sucessivas previsões de vazão com chuva perfeita na estação Porto do Mesquita, com intervalo de tempo horário, frequência de emissão de 6h e horizonte de previsão de 72h, durante um período de cerca de oito anos. Os resultados mostraram que o procedimento de assimilação tem impacto positivo na previsão de vazões. As previsões com chuva perfeita no cenário com assimilação de dados apresentaram uma melhora significativa em relação ao cenário sem assimilação de dados. Em termos do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe-NS, a melhora no desempenho nos primeiros intervalos de tempo do horizonte de previsão pelo uso do método de assimilação foi de cerca de 20%, diminuindo para cerca de 5% para as antecedências próximas às 72h. A previsão com assimilação de dados mostrou ainda superioridade sobre a persistência (último valor de vazão observado) a partir da oitava hora de previsão, enquanto a previsão sem assimilação de dados mostrou benefício sobre a persistência a partir da trigésima oitava hora de previsão. Esses resultados reafirmam a importância da utilização de procedimentos de assimilação de dados para correção das condições iniciais do modelo na previsão de vazões.

8.2.3 Previsão de cheias por conjunto

As previsões de vazões foram realizadas retrospectivamente no período entre ago/2008 e mai/2011, sendo analisadas durante o período chuvoso dos anos hidrológicos (out-abr). Os resultados das previsões de cheia por conjunto foram avaliados através de uma representação determinística, considerando a média dos membros que compõem o conjunto, assim como através de uma representação probabilística, considerando todos os membros, através de medidas de desempenho específicas para esse fim. Como parâmetro de referência nas análises foi utilizada a previsão determinística MSMES-H. As previsões foram realizadas com intervalo de tempo horário e horizonte de 72h.

Na avaliação da média do conjunto observou-se, de modo geral, uma superestimativa das previsões de vazão, com uma tendência de diminuição do desempenho com o aumento da antecedência e magnitude das vazões. As comparações determinísticas envolvendo a média do conjunto e a previsão de referência MSMES-H, mostraram que as previsões possuem desempenhos similares na simulação dos hidrogramas, com ligeira superioridade da previsão MSMES-H. A média do conjunto apresentou ainda superioridade significativa em relação à maior parte dos membros do conjunto.

Na análise dos resultados das previsões por conjunto, observou-se que o espalhamento entre os membros é menor nas antecedências iniciais do horizonte de previsão, o que tem relação com o tempo de resposta da bacia. Nessas antecedências, o conjunto captou uma menor proporção das observações. Com o aumento da antecedência, houve um aumento no espalhamento do conjunto, o que permitiu captar uma proporção maior das observações, melhorando sua confiabilidade. Na antecedência de 72h o espalhamento do conjunto foi máximo, assim como a proporção de observações captadas pelo conjunto. Os resultados da análise indicaram a existência, preponderantemente, de uma superestimativa e um subespalhamento das previsões por conjunto, problemas frequentemente observados na literatura.

Na avaliação das previsões de eventos do tipo dicótomos, observou-se que decis na extremidade superior do conjunto, representados pelo 9º decil, possuem melhor desempenho que a previsão determinística de referência e mesmo a média do conjunto, sendo possível obter um aumento significativo na proporção de eventos corretamente previstos mantendo a taxa de alarmes falsos em níveis reduzidos. Esse benefício foi, de modo geral, maior para as maiores vazões limites e antecedências, situações mais importantes num contexto de prevenção de cheias. Para todas as antecedências e vazões limites avaliadas, o 9º decil do conjunto apresentou proporções de detecção correta do evento de cheia maiores ou iguais a 90% e taxas de alarme falso inferiores a 20%, considerado um bom resultado.

As análises das previsões por conjunto através de Diagramas de Excedência mostraram ainda que para maior parte dos eventos analisados é possível obter uma indicação mais persistente e com maior antecedência da ocorrência da cheia, em comparação com a previsão determinística MSMES-H.

Acredita-se, com base nos resultados obtidos nessa pesquisa, que a utilização da abordagem probabilística representa uma perspectiva promissora na detecção e antecipação de cheias, apresentando benefício sobre previsões determinísticas, sobretudo em previsões de eventos do tipo dicótomos, importantes na emissão de alertas de cheias.

8.2.4 Análise do impacto da redução do número de membros

Previsões de cheia por conjunto com redução de 50% e 75% do número de membros foram avaliadas ao longo dos três períodos chuvosos. Os resultados mostraram que, em média, conjuntos com um menor número de membros apresentam desempenho inferior a conjuntos com um maior número de membros.

8.3 Recomendações

Como recomendações para pesquisas posteriores, sugerem-se:

- Na revisão bibliográfica foram abordadas as diferentes técnicas usadas para assimilação de dados na previsão de vazões. Alguns trabalhos propõem o acoplamento entre diferentes técnicas de assimilação de dados objetivando a melhora do desempenho das previsões. Nesse sentido, poderiam ser investigados acoplamentos entre o método de assimilação de dados atualmente empregado no modelo MGB-IPH com um procedimento de atualização na saída, aplicado de maneira independente ao modelo de previsão. Exemplos de métodos de atualização da saída que poderiam ser utilizados são modelos autoregressivos do tipo AR, ARMA, ARIMA ou ainda modelos de redes neurais artificiais;
- Para geração das previsões por conjunto nessa pesquisa foi utilizado um conjunto de previsões de precipitação derivadas de diferentes modelos meteorológicos, disponibilizadas, em geral, acumuladas em intervalos de seis horas no local de estações de monitoramento de superfície. Para compatibilizar o intervalo de tempo das previsões ao de simulação do modelo hidrológico, essas informações foram desagregadas uniformemente com discretização temporal de uma hora. Sugere-se a avaliação de outras formas de desagregação no tempo, usando outras distribuições temporais diferentes da uniforme. Outras questões relacionadas ao conjunto de previsões de precipitação que poderiam potencialmente melhorar o desempenho das previsões hidrológicas são: a) uso de previsões de precipitação na forma de grades, o que poderia trazer um benefício na representação do campo espacial de precipitação prevista na bacia, e b) investigação de métodos pré-processamento para correção das previsões de precipitação com base na climatologia;

- Na avaliação dos resultados das previsões por conjunto foram identificados um subespalhamento e a presença de erros sistemáticos (superestimativas). A consideração de outras fontes de incerteza nas previsões tais como as relacionadas as condições iniciais ou a parametrização do modelo hidrológico, poderia contribuir para aumentar o espalhamento dos membros, levando o conjunto captar uma proporção maior de dados observados, melhorando assim sua confiabilidade. A incerteza nas condições iniciais pode ser considerada na previsão, por exemplo, através de perturbações inseridas na precipitação observada num período anterior ao início da previsão ou ainda pelo uso de diferentes estimativas de precipitação, como aquelas derivadas de sensores remotos com radares e satélite meteorológicos. O uso de métodos de pós-processamento para correção das previsões hidrológicas também poderia ser investigado.

Referências Bibliográficas

- ABEBE, A.J. & PRICE, R.K. (2003). Managing uncertainty in hydrological models using complementary models. *Hydrological Sciences*, 48(5), p.679-692.
- ALFIERI, L.; THIELEN, J. & PAPPENBERGER, F. (2012). Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern Switzerland. *Journal of Hydrology*, v.424–425, p.143–153.
- AMARAL, F.C.S. (1993). Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais: Avaliação e Adequação. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo.
- ANDEL, S.J.V.; WEERTS, A.; SCHAAKE, J. & BOGNER, K. (2012). Post-processing hydrological ensemble predictions intercomparison experiment. *Hydrological Processes*. Accepted Article.
- ANDERSON, M.G. & BURT, T.P. (1985). Modelling Strategies. In: *Hydrological Forecasting*. Chapter 1: Modelling Strategies. Edited by M.G. Anderson and T.P. Burton. John Wiley & Sons, p. 1-16.
- ANDREOLLI, I. (2003). Previsão de Vazão em Tempo Real no Rio Uruguai com Base na Previsão Meteorológica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 182p.
- ARAVÉQUIA, J.A. & QUADRO, M.F.L. (2003). Aspectos Gerais da Previsão Numérica de Tempo e Clima. (INPE-10211-PUD/135). Cachoeira Paulista: CPTEC. 57p. Disponível em <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/12.23.10.21>. Acessado em agosto de 2011.
- ARRIBAS, A.; ROBERTSON, K.B. & MYLNE, K.R. (2005). Test of a Poor Man's Ensemble Prediction System for Short-Range Probability Forecasting. *Monthly Weather Review*, v.133, p.1825-1839.
- BACCHI, B. & RANZI, R. (2003). Hydrological and meteorological aspects of floods in the Alps: an overview. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(6), p.784-798.
- BAO, H.-J.; ZHAO, L.-N., HE, Y.; LI, Z.-J.; WETTERHALL, F.; CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. & MANFUL, D. (2011). Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast. *Adv. Geosci.*, 29, p.61–67.
- BARTHOLMES, J. & TODINI, E. (2005). Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, p.333-346.
- BERTHET, L.; RAMOS, M.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; LOUMAGNE, C. (2009). Can discharge assimilation methods be used to improve flood forecasting when few data are available? *New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions (Proc. of Symposium HS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention)*. IAHS Publ., p.94-100.
- BEVEN, K.; WARREN, R. & ZAOU, J. (1980). SHE: Towards a methodology for physically-based distributed forecasting in hydrology. *Hydrological Forecasting (Proceedings of the Oxford Symposium, April 1980)*: IAHS – AISH Publ. n°. 129, p.133-137.
- BEVEN, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, v.320, p. 18–36.
- BOUCHER, M.A.; ANCTIL, F.; PERREAULT, L.; TREMBLAY, D. (2011). A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context. *Advances in Geosciences*, 29, p.85-94.
- BRAVO, J.M. (2006). Otimização da Operação de um Reservatório para Controle de Cheias com Base na Previsão de Vazão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 136p.

- BREMICKER, M. (1998). Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells. Dissertation, Doktorgrad, Geowissenschaftlicher Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg. Juli.
- BROERSEN, P.M.T. & WEERTS, A.H. (2005). Automatic error correction of rainfall-runoff models in flood forecasting systems. In: Proceedings IEEE/IMTC Conference, Ottawa, Canada, p.1531-1536.
- BROCHERO, D.; ANCTIL, F. & GAGNÉ, C. (2011). Simplifying a hydrological ensemble prediction system with a backward greedy selection of members – Part 1: Optimization criteria. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.15, p.3307-3325.
- BROWN, J.D. (2008). Ensemble verification refresher. Second Verification Workshop, CBRFC, 11/18/08. Disponível em http://www.nws.noaa.gov/oh/rfcdev/docs/JBrown_ensemble_verification_refresher_RFCworkshop_Nov08_Part2.pdf. Acessado em agosto de 2012.
- BROWN, J.D. & SEO, D. (2010). A Nonparametric Postprocessor for Bias Correction of Hydrometeorological and Hydrologic Ensemble Forecasts. *Journal of Hydrometeorology*, v. 11, p.642-665.
- BROWN, J.D.; DEMARGNE, J.; DONG-JUN SEO & LIU, Y. (2010). The Ensemble Verification System (EVS): A software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations. *Environmental Modelling & Software*, v. 25, issue 7, p.854-872.
- BUARQUE, D.C.; FAN, F.M.; PAZ, A.R. & COLLISCHONN, W. (2009). Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. *RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, p.91-103.
- BUARQUE, D.C.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.C.D. & KAYSER, R. (2011). Manual do PrePro-MGB para aplicação do modelo MGB-IPH - Versão 4.1, Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico, FINEP/ANA/IPH-UFRGS, Porto Alegre-RS, 19p.
- BUIZZA, R. & PALMER, T.N. (1998). Impact of Ensemble Size on Ensemble Prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 126, p.2503-2518.
- BURLANDO, P.; ROSSO, R.; CADAVID, L.G.; SALAS, J.D. (1993). Forecasting of short-term rainfall using ARMA models. *Journal of Hydrology*, v.144, issues 1-4, p.193-211.
- CALVETTI, L.(2011). Previsão hidrometeorológica probabilística na Bacia do Alto Iguaçu-PR com os modelos WRF e TopModel. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade Federal de São Paulo. 141p.
- CANDILLE, G. & TALAGRAND, O. (2005). Evaluation of probabilistic prediction systems for a scalar variable. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.131, Issue 609, p. 2131-2150.
- CAWCR-Centre for Australian Weather and Climate Research (2012). Forecast Verification: Issues, Methods and FAQ. Disponível em <http://www.cawcr.gov.au/>. Acessado em março de 2012.
- CARTER, M.M., ELSNER, J.B. & BENNETT, S.P. (2000). A quantitative precipitation forecast experiment for Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 239, p.162-178.
- CLOKE, H.L. & PAPPENBERGER, F. (2008). Evaluating forecasts of extreme events for hydrological applications: an approach for screening unfamiliar performance measures. *Meteorological Applications*, v.15, issue 1, p.181-197.
- CLOKE, H.L. & PAPPENBERGER, F. (2009). Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology*, v.375, Issues 3-4, p.613-626.
- COLLIER, C.G. & KRZYSZTOFOWICZ, R. (2000). Quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*, 239, p.1-2.
- COLLISCHONN, W. (2001). Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 277p.

- COLLISCHONN, W. & TUCCI, C.E.M. (2005). Previsão Sazonal de Vazão na Bacia do Rio Uruguai 1: Ajuste e Verificação do Modelo Hidrológico Distribuído. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH*, v.10, n.4, p.43-59.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; CHOU, S.C.; GUILHON, L.G.; CATALDI, M.; ALLASIA, D. (2007). Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. *Journal of Hydrology*, v.344, p. 112-122.
- COMET (2008). Introduction to verification forecasts - On-line course. The Cooperative Program for Operational Meteorology, Education and Training. University Corporation for Atmospheric Research's (UCAR's). Disponível em <https://www.meted.ucar.edu/>. Acessado em 2011.
- CPRM (Serviço Geológico do Brasil), 2011. Projeto Atlas Pluviométrico do Brasil. Isoietas Anuais Médias no período entre 1977 e 2006. Dados em formato digital, disponíveis em <http://www.cprm.gov.br/>.
- CROW, W.T. & RYU, D. (2009). A new data assimilation approach for improving hydrologic prediction using remotely-sensed soil moisture retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, p.1-16.
- DANCE, S.L. & ZOU, Q.P. (2010). Ensembles, uncertainty and flood prediction. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7, p.3591-3611.
- DAVOLIO, S.; MIGLIETTA, M.M.; DIOMEDE, T.; MARSIGLI, C.; MORGILLO, A. & MOSCATELLO, A. (2008). A meteo-hydrological prediction system based on a multi-model approach for precipitation forecasting, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, p.143-159.
- DAY, G.N. (1985). Extended Streamflow Forecasting Using NWSRFS. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 111(2), p. 157-170.
- DEMARGNE, J.; BROWN, J.; LIU, Y.; SEO, D.-J.; WU, L. & TOTH, Z. (2010). Diagnostic verification of hydrometeorological and hydrologic ensembles. *Atmospheric Science Letters*, v.11, p.114–122.
- DEMERRIT, D.; CLOKE, H.; PAPPENBERGER, F., THIELEN, J.; BARTHOLMES, J. & RAMOS, M.-H. (2007). Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. *Environmental Hazards*, 7, p.115–127.
- DEMERRIT, D.; NOBERT, S.; CLOKE, H. & PAPPENBERGER, F. (2010). Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. *Meteorol. Appl.*, v.17, p.209–222.
- DEMERRIT, D.; NOBERT, S.; CLOKE, H. & PAPPENBERGER, F. (2012). The European Flood Alert System (EFAS) and the communication, perception and use of ensemble predictions for operational flood risk management. *Hydrological Processes*. Aceito para publicação.
- DIETRICH, J.; SCHUMANN, A.H.; REDETZKY, M.; WALTHER, J.; DENHARD, M.; WANG, Y.; PFUTZNER, B.; BUTTNER, U. (2009). Assessing uncertainties in flood forecasts for decision making: prototype of an operational flood management system integrating ensemble predictions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, p.1529–1540.
- DIVAC, D.; MILIVOJEVIĆ, N.; GRUJOVIĆ, N.; STOJANOVIĆ, B.; SIMIĆ, Z. (2009). A Procedure for State Updating of SWAT-Based Distributed Hydrological Model for Operational Runoff Forecasting. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, v.3, n.1, p.298-326.
- DU, JUN; MULLEN, S.L. & SANDERS, F. (1997). Short-Range Ensemble Forecasting of Quantitative Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 125, p.2427–2459.
- EBERT, E.E. (2000). Ability of a Poor Man's Ensemble to Predict the Probability and Distribution of Precipitation. *Monthly Weather Review*, v.129, p.2461-2480.
- EBERT, C., BARDOSSY, A. & BLIEFERNICHT, J. (2006). Integration strategy for ensemble predictions of a limited area model into a short-range flood forecasting system. In: CHR-Workshop – Expert Consultation “Ensemble Predictions and Uncertainties in Flood Forecasting”. Bern, Switzerland, 30 and 31 March 2006.

- ENVIRONMENT AGENCY (2002). Fluvial Flood Forecasting for Flood Warning – Real Time Modelling. Defra/Environment Agency Flood and Coastal Defense. R&D Programme. R&D Technical Report W5C-013/5/TR.
- EVA, H.D.; BELLA, C.M.; GOND, V.; HUBER, O.; SGRENZAROLI, M.; JONES, S.; COUTINHO, A.; DORADO, A.; GUIMARÃES, M.; ELVIDGE, C.; ACHARD, F.; BELWARD, A.S.; BARTHOLOMÉ, E.; BARALDI, A.; DE GRANDI, G.; VOGT, P.; FRITZ, S. E HARTLEY, A. (2002). A vegetation Map of South America. EU 20159, European Comission, Joint Research Centre, Luxembourg.
- FAN, M.F. (2011). Acoplamento entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica: Integração do Modelo MGB-IPH. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 179 p.
- FARR, T.G. et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, v.45, Issue 2.
- FEYEN, L.; VÁSQUEZ, R.; CHRISTIAENS, K.; SELS, O.; FEYEN, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, v.4; p.47-63.
- FRANZ, K. J. & HOGUE, T.S. (2011). Evaluating uncertainty estimates in hydrologic models: borrowing measures from the forecast verification community. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, p.3085–3131.
- FRALEY, C. & RAFTERY, A.E. (2010). Calibrating Multimodel Forecast Ensembles with Exchangeable and Missing Members Using Bayesian Model Averaging. *Monthly Weather Review*, v. 138, p.190-202.
- GOLDING, B.W. (2000). Quantitative precipitation forecasting in the UK. *Journal of Hydrology*, 239, p.286–305.
- GOSWAMI, M. & O’CONNOR, K.M. (2005). Real-time flow forecasting in the absence of quantitative precipitation forecasts: A multi-model approach. *Journal of Hydrology*, 334, p.125– 140.
- GOUWELEEUW, B. T., THIELEN, J., FRANCHELLO, G., DE ROO, A. P. J., & BUIZZA, R. (2005). Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.9, p.365–380.
- HABETS, F.; LEMOIGNE, P. & NOILHAN, J. (2004). On the utility of operational precipitation forecasts to serve as input for streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*, n.293, p.270-288.
- HAPUARACHCHI ; H.A.P.; Q. J. WANG; PAGANO, T. C. (2011). A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological Processes*, v.25, p.2771–2784.
- HE, M.; HOGUE, T.S.; MARGULIS, S.A. & FRANZ, K.J. (2012). An integrated uncertainty and ensemble-based data assimilation approach for improved operational streamflow predictions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, p.815–831.
- HOU, D., MITCHELL, K.; TOTH, Z.; LOHMANN, D. & WEI, H. (2009): The Effect of Large-Scale Atmospheric Uncertainty on Streamflow Predictability. *J. Hydrometeor*, 10, p.717–733.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas (2005). Estudos das Metas de Qualidade: Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. Diagnóstico Estratégico da Bacia Hidrográfica e Cenários de Desenvolvimento. Disponível em http://aguas.igam.mg.gov.br/aguas/downloads/acordo_resultados/ Acessado em janeiro de 2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2002). Mapa de Climas do Brasil. Disponível em ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/. Acessado em outubro de 2012.

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012). Estimativas preliminares de população para os municípios brasileiros para 1º de julho de 2011. Publicado no Diário Oficial da União, em 31 de agosto de 2011.
- INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. (1992). Normais Climatológicas. 155p.
- JAUN, S.; AHRENS, B.; WALSER, A.; EWEN, T. & SCHÄR, C. (2008). A probabilistic view on the August 2005 floods in the upper Rhine catchment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v.8, p.281–291.
- KAHL, B. & NACHTNEBEL, H.B. (2008). Online updating procedures for a real-time hydrological forecasting system. XXIVth Conference of the Danubian Countries. IOP Publishing, 8 p.
- KALNAY, E. (2003). Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge University Press, 1 edition (December 16, 2002), 364p.
- KITANIDIS, P.K. & BRAS, R.L. (1980). Real time forecasting with a conceptual hydrologic model 2: applications and results. *Water Resources Research*, 16 (6), p.1034–1044.
- KOMMA, J.; RESZLER, C.; BLOSCHL, G. & HAIDEN, T. (2007). Ensemble prediction of floods – catchment non-linearity and forecast probabilities. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, p.431–444.
- KOUWEN, N.; SOULIS, E.D.; PIETRONIRO, A.; DONALD, J. & HARRINGTON, R.A. (1993). Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 119, n.3, p.289-305.
- KRISHNAMURTI, T.N.; KISHTAWAL, C.M.; LAROW, T.E.; BACHIOCHI, D.R.; ZHANG, Z.; WILLIFORD, C.E.; GADGIL, S. & SURENDRAN, S. (1999). Improved Weather and Seasonal Climate Forecasts from Multimodel Superensemble. *Science*, v.285, p.1548-1550.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. (1999). Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resources Research*, v. 35, n.9, p.2739-2750.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. (2001). The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology*, v.249, Issues 1–4, p.2–9.
- LAIO, F. & TAMEA, S. (2007). Verification tools for probabilistic forecasts of continuous hydrological variables. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, p.1267–1277.
- LAUZON, N.; BIRIKUNDAVYI, S; GIGNAC, C. & ROUSSELLE, J. (1997). Comparaison de deux procédures d'amélioration des prévisions à court terme des apports naturels d'un modèle déterministe. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.24, p.723-735.
- LETTENMAIER, D.P. & WOOD, E.F. (1993). Hydrologic Forecasting. Chapter 22. In: *Handbook of Hydrology*. Editor Chefe: David Maidment. Ed. McGraw-Hill, Inc.
- LEUTBECHER, M. & PALMER, T.N. (2008). Ensemble forecasting. *Journal of Computational Physics*, v.227, p.3515–3539.
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F. & BURGESS, S. J. (1994) A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, v.99, p.14415-14428.
- LORENZ, E.N. (1969). Three approaches to atmospheric predictability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v.50, p.345-351.
- LYNCH, P. (2008). The origins of computer weather prediction and climate modeling. *Journal of Computational Physics*, 227, p.3431–3444.
- MACHADO, L.H.R.; MENDONÇA, A.M.; MENDONÇA, R.W.B. & BONATTI, J.P. (2001). Impacto da utilização de previsões “defasadas” no sistema de previsão de tempo por conjunto do CPTEC/INPE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.1, 54 - 69, 2010.
- MADSEN, H. & SKOTNER, C. (2005). Adaptive state updating in real-time river flow forecasting - A combined filtering and error forecasting procedure, *Journal of Hydrology*, v.308, p.302-312.

- MELLER, A.; BRAVO, J.M. & COLLISCHONN, W. (2012). Assimilação de dados de vazão na previsão de cheias em tempo-real com o modelo hidrológico MGB-IPH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH*, v.17, n.3, Jul/Set 2012, p.209-224.
- MOORE, R.J. & CLARKE, R.T. (1981). A distribution function approach to rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 17, p.1367-1382.
- MOORE, R.J.; BELL, V.A. & JONES, D.A. (2005). Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geoscience*, v.337, issue 1, p.203-217.
- MOORE, R.J. (2007). The PDM rainfall-runoff model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.11, issue 1, p.483-499.
- MOREIRA, D.S.; SILVA DIAS, P.L. & LUCIO, P.S. (2006). Sistema de avaliação estatística de modelos numéricos de previsão do tempo. In: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET)*. Florianópolis-SC.
- MURPHY, A.H. (1993). 1993: What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. *Weather and Forecasting*, 8, p.281-293.
- NAGHETTINI, M. & PINTO, E.J.A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Belo horizonte: CPRM. 552p.
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), p.282-290.
- NOBERT, S., DEMERITT, D. & CLOKE, H. (2010). Informing operational flood management with ensemble predictions: lessons from Sweden. *Journal of Flood Risk Management*, 3, p.72-79.
- NUNES, L.H.; VICENTE, A.K. & CANDIDO, D.H. (2009). *Clima da Região Sudeste do Brasil*. In: *Tempo e Clima no Brasil*. Organizadores: Iracema F.A. Cavalcanti... [et al.]. São Paulo: Oficina de Textos. 463p.
- O'CONNELL, P. E. & CLARKE, R. T. (1981) Adaptive hydrological forecasting - a review. *Hydrol. Sci. Bull.* 26(2), p.179-205.
- OLIVEIRA, J.L. & SILVA, M.G.A.J. (2000). Verificação das previsões de precipitação divulgadas pelos jornais para a cidade do Rio de Janeiro. In: *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro-RJ, outubro, 2000.
- PAIVA, R.C.D. (2009). Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: Bacia do Rio Solimões. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 168p.
- PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K.J.; HUNTER, N.M.; BATES, P.D.; GOUWEELEEUW, B.T.; THIELEN, J. & DE ROO, A.P.J. (2005). Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.35, p.381-393.
- PAPPENBERGER, F.; BARTHOLMES, J.; THIELEN, J.; CLOKE, H.L.; BUIZZA, R.; DE ROO, A. (2008). New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions. *Geophysical Research Letters*, v.35, 7p.
- PAPPENBERGER, F.; THIELEN, J. & DEL MEDICO, M. (2011). The impact of weather forecast improvements on large scale hydrology: analysing a decade of forecasts of the European Flood Alert System. *Hydrol. Process.*, 25, p.1091-1113.
- PAPPENBERGER, F.; STEPHENS, E.; THIELEN, J.; SALAMON, P.; DEMERITT, D.; VAN ANDEL, S.K.; WETTERHALL, F.; ALFIERI, L. (2012). Visualizing probabilistic flood forecast information: expert preferences and perceptions of best practice in uncertainty communication. *Hydrol. Process.*, v.26.
- PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; ALLASIA, D. (2007). Data Assimilation in a large-scale distributed hydrological model for medium-range flow forecasts. Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management. In: *Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007*, Perugia, July 2007. IAHS Publi., p.471-478.

- PAZ, A.R. & COLLISCHONN, W. (2011). Avaliação de estimativas de campos de precipitação para modelagem hidrológica distribuída. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, p.287-294.
- PEDDER, M. A.; HAILE, M. & THORPE, A. J. (2000). Short period forecasting of catchment-scale precipitation. Part I: the role of Numerical Weather Prediction, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 4, p.627–633.
- PHILPOTT, A.W.; WNEK, P. & BROWN, J.D. (2012). Verification of Ensembles at the Middle Atlantic River Forecast Center. In: 92nd American Meteorological Society Annual Meeting (January 22-26, 2012), New Orleans.
- PINTO, E.J.A.; DAVIS, E.G.; NUNES, H.M.T.; PAULO, R.G.F.; CARVALHO, D.D. (2005). Verificação das Previsões de Precipitação Realizadas com o Modelo MM5 para o Sistema de Alerta de Cheias da Bacia do Rio Doce. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH: João Pessoa, 2005.
- PLATE, E. (2007). Early warning and flood forecasting for large rivers with the lower Mekong as example. *Journal of Hydro-environment Research*, v.1, Issue 2, p.80-94.
- PRUDHOMME, C.; REYNARD, N. & CROOKS, S. (2002). Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes. Hydrol. Process.* 16, p.1137– 1150.
- QUEIROGA, Y.G.A. & SILVA, F.E.O. (2005). Utilização de Assimilação de Erros nas Previsões Hidrológicas do Sistema de Alerta da Bacia do Rio Doce - O Caso de Ponte Nova. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH: João Pessoa, 2005.
- RAFTERY, A.E.; GNEITING, T.; BALABDAOUI, F. & POLAKOWSKI, M. (2005). Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles. *Mon. Wea. Rev.*, 133, p.1155–1174.
- RAMOS, M.-H.; BARTHOLMES, J. & THIELEN, J. (2007). Development of decision support products based on ensemble forecasts in the European flood alert system. *Atmos. Sci. Let.*, p.113-119.
- RAMOS, M.-H; MATHEVET, T.; THIELEN, J. & PAPPENBERGER, F. (2010). Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: mission impossible? *Meteorological Applications*, v.17, Issue 2, p.223–235
- RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. (1993). Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D. *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- REFSGAARD, J.C. (1997). Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrology*, v.28, p.65-84.
- REFSGAARD, J.C. & STORM, B. (1995). MIKE SHE. In: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Ed.: Singh, V.P., Water Resources Publications, USA, p.806-846.
- RENNER, M.; WERNER, M.G.F.; RADEMACHER, S. & SPROKKEREEF, E. (2009). Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine. *Journal of Hydrology*, 376, p.463–475.
- RICHARDSON, D.S. (2000). Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126, p.649-667.
- ROULIN, E. (2007). Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, p.725–737.
- ROSSA, A., LIECHTI, K., ZAPPA, M., BRUEN, M., GERMANN, U., HAASE, G., KEIL, C., & KRAHE, P. (2011). The COST 731 action: a review on uncertainty propagation in advanced hydrometeorological forecast systems, *Atmos. Res.*, v.100, p.150–167.
- ROTACH, M. W.; ARPAGAU, M.; DORNINGER, M.; HEGG, C.; MONTANI, A. & RANZI, R. (2012). Uncertainty propagation for flood forecasting in the Alps: different views and impacts from MAP D-PHASE. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, p.2439–2448.

- SCHAAKE, J. (2006). Hydrologic Ensemble Prediction: Past, Present and Opportunities for the Future. In: CHR-Workshop – Expert Consultation “Ensemble Predictions and Uncertainties in Flood Forecasting”. Bern, Switzerland, 30 and 31 March 2006.
- SCHAAKE, J.; FRANZ, K.; BRADLEY, A. & BUIZZA, R. (2006). The Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment (HEPEX). *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, p.3321–3332.
- SCHUURMANS, J.M.; TROCH, P.A.; VELDHUIZEN, A.A.; BASTIAANSEN, W.G.M.; BIERKENS, M.F.P. (2003). Assimilation of remotely sensed latent heat flux in a distributed hydrological model. *Advances in Water Resources*, v.26, issue 2, p.151-159.
- SHELLEKENS, J.; WEERTS, A.H.; MOORE, R.J.; PIERCE, C.E. & HILDON, S. (2011). The use of MOGREPS ensemble rainfall forecasts in operational flood forecasting systems across England and Wales. *Adv. Geosci.*, 29, p.77–84.
- SCHNEIDER, C.; FLÖRKE, M.; EISNER, S. & VOSS, F. (2011). Large scale modelling of bankfull flow: An example for Europe. *Journal of Hydrology* 408 (2011) 235–245.
- SENE, K. (2008). *Flood Warning, Forecasting and Emergency Response*. Publisher: Springer, 1 edition (December 17, 2009), 316 p.
- SENE, K. (2010). *Hydrometeorology: Forecasting and Applications*. Publisher: Springer, 1 edition (December 17, 2009), 366 p.
- SERBAN, P. & ASKEW, A.J. (1991). Hydrological Forecasting and Updating Procedures. In: *Hydrology for the Water Management of Large River Basins (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991)*. IAHS Publ. no. 201, p.57-369.
- SHRESTHA, M.S.; ARTAN, G.A., BAJRACHARYA, S.R.; SHARMA, R.R. (2008). Using satellite-based rainfall estimates for streamflow modeling: Bagmati Basin. *Journal of Flood Risk Management*, 1(2008), p.89-99.
- SHUTTLEWORTH, W.J. (1993). Evaporation. In: *Handbook of Hydrology*, David Maidment, editor, McGraw-Hill, New York, 1993.
- SILVA, B.C. (2005). *Previsão Hidroclimática de Vazão para a Bacia do Rio São Francisco*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 280 p.
- SILVA, M.G.A.J.; BARBOSA, M.C.D.; XAVIER, M.C.A. (2000). Sistema Alerta-Rio: Verificação Objetiva das Previsões de Precipitação e Temperatura. In: *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*.
- SILVA DIAS, P.L.; MOREIRA, D.S. & DOLIF NETO, G. (2006). The Master Super Model Ensemble System (MSMES). *Proceedings of 8 ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, p.1751-1757.
- SORRIBAS, M. V. (2011) *Simulação da Dinâmica de Carbono em Bacias Hidrográficas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 127p.
- SRIKANATHAN, R.; AMIRTHANANTHAN, G. & KUCZERA, G. (2007) Real-time Flood Forecasting Using Ensemble Kalman Filter. In Oxley, L. and Kulasiri, D. (eds) *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2007, p.74-80.
- SRIKANATHAN, R.; ELLIOTT, J. F. & ADAMS, G. A. (1994). A Review of Real-Time Flood Forecasting Methods. A report as part of Project D4: Development of a real-time flood forecasting model. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology-CRC. April 1994.
- THIELEN, J.; BARTHOLMES, J.; RAMOS, M.-H. & DE ROO, A. (2009). The European flood alert system – Part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (2), p.125–140.
- THIEMIG, V.; PAPPENBERGER, F.; THIELEN, J.; GADAIN, H.; DE ROO, A.; BODIS, K.; DEL MEDICO, M. & MUTHUSI, F. (2010). Ensemble flood forecasting in Africa: a feasibility study in the Juba–Shabelle river basin. *Atmos. Sci. Let.*, p.123–131.

- THIREL, G.; REGIMBEAU, F.; MARTIN, E. & HABETS, F. (2008). On the Impact of Short-Range Meteorological Forecasts for Ensemble Streamflow Predictions. *Journal of Hydrometeorology*, v. 9, p. 1301-1317.
- THIREL, G.; MARTIN, E.; MAHFOUF, J.-F.; MASSART, S.; RICCI, S.; REGIMBEAU, F. & HABETS, F. (2010). A past discharge assimilation system for ensemble streamflow forecasts over France – Part 2: Impact on the ensemble streamflow. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, p.1639–1653.
- TOTH, E., BRATH, A. & MONTANARI, A. (2000). Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 239, p.132–147.
- TUCCI, C.E.M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Primeira Edição. ABRH: Porto Alegre. 669 pg.
- TUCCI, C.E.M. (2005). *Modelos Hidrológicos*. Segunda Edição. ABRH: Porto Alegre. 678 pg.
- TUCCI, C.E.M. & COLLISCHONN, W. (2003). Previsão de Vazão. In: *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRH, p.281-348.
- UNITED NATIONS-UN (2004). *Guidelines for Reducing Flood Losses*. Editor: Paul J. Pilon. 79p.
- VAN DER KNIJFF J.M.; J. YOUNIS & A.P.J. DE ROO (2010). LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river-basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 24, No.2, p.189-212.
- VELÁZQUEZ, J.A.; PETIT, C.; LAVOIE, A.; BOUCHER, M.-A., TURCOTTE, R.; FORTIN, V. & ANCTIL, F. (2009). An evaluation of the Canadian global meteorological ensemble prediction system for short-term hydrological forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, p.2221–2231.
- VELÁZQUEZ, J.A.; ANCTIL, F.; RAMOS, M.H. & PERRIN, C. (2011). Can a multi-model approach improve hydrological ensemble forecasting? A study on 29 French catchments using 16 hydrological model structures. *Adv. Geosci.*, 29, p.33–42.
- VERBUNT, M.; WALSER, A.; GURTZ, J.; MONTANI, A. & SCHÄR, C. (2007). Probabilistic flood forecasting with limited-area ensemble prediction system: selected case studies. *Journal of Hydrometeorology*, v.8, p.897-909.
- VOISIN, N., PAPPENBERGER, F.; LETTENMAIER, D.P.; BUIZZA, R. & SCHAAKE, J.C. (2011). Application of a Medium-Range Global Hydrologic Probabilistic Forecast Scheme to the Ohio River Basin. *Wea. Forecasting*, 26, p.425–446.
- WERNER, M., Reggiani, P.; De Roo, A.; Bates, P. & Sprokkereef, E. (2005). Flood Forecasting and Warning at the River Basin and at the European Scale. *Natural Hazards*, v.36, p.25-42.
- WILKS, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 2a ed., 627p.
- WÖHLING, TH.; LENNARTZ, F. & ZAPPA, M. (2006). Technical Note: Real-time updating procedure for flood forecasting with conceptual HBV-type models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, p.783–788.
- XIE, X & ZHANG, D. (2010). Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble Kalman filter. *Advances in Water Resources*, v.33, issue 6, p.678-690.
- XIONG, L. & O’CONNOR, K.M. (2002). Comparison of four updating models for real-time river flow forecasting. *Hydrological Sciences Journal (IAHS)*, 47(4), p.621-639.
- XUAN, Y.; CLUCKIE, I.D. & WANG, Y. (2009). Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilising short-range rainfall prediction. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 13, p.293–303.
- YAPO, P.O.; GUPTA, H.V. & SOROOSHIAN, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, v.204, issues 1-4, p. 83-97.
- YOUNIS, J.; RAMOS, M.-H.; THIELEN, J. (2008). EFAS forecasts for the March–April 2006 flood in the Czech part of the Elbe River Basin – a case study. *Atmospheric Science Letters*, 9, p.88–94.
- YU, P. & CHEN, S. (2005). Updating real-time flood forecasting using a fuzzy rule-based model. *Hydrological Sciences Journal*. 50:2, p.265-278.

- ZALACHORI, I.; RAMOS, M.-H.; GARÇON, R.; MATHEVET, T. & GAILHARD, J. (2012). Statistical processing of forecasts for hydrological ensemble prediction: a comparative study of different bias correction strategies. *Advances in Science & Research*, v. 8, p.135-141.
- ZHANG, H. & PU, Z. (2010). Beating the Uncertainties: Ensemble Forecasting and Ensemble-Based Data Assimilation in Modern Numerical Weather Prediction. Review Article. *Advances in Meteorology*, v.10, 10p.
- ZHAO, L.; QI, D.; TIAN, F.; WU, H.; DI, J.; WANG, Z. & LI, A. (2012). Probabilistic flood prediction in the upper Huaihe catchment using TIGGE data. *Acta Meteorologica Sinica*, v.26, p.62-71.
- ZAPPA, M.; ROTACH, M.W.; ARPAGAU, M.; DOMINGER, M.; HEGG, C.; MONTANI, A.; RANZI, R.; AMENT, F.; GERMAN, U.; GROSSI, G.; JAUN, S.; ROSSA, A.; VOGT, S.; WALSER, A.; WEHRHAN, J. & WUNRAM, C. (2008). MAP D-PHASE: real-time demonstration of hydrological ensemble prediction systems. *Atmos. Sci. Let.*, 9, p.80–87.
- ZAPPA, M; JAUN, S.; GERMAN, U.; WALSER, A. & FUNDEL, F. (2011). Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmospheric Research*, 100, p.246–262.

Anexos

Anexo 1

Parâmetros fixos e calibráveis do modelo MGB-IPH

Tabela 13. Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH. (Fonte: FAN, 2011)

Parâmetro Fixos	Descrição
Índice de Área Foliar (IAF)	O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. É um parâmetro adimensional e que, em geral, pode ser medido ou estimado a partir de informações da bibliografia.
Albedo	O albedo é a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo.
Resistência Superficial	A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.
Altura do Dossel	A altura média da vegetação é utilizada no modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle da evapotranspiração. Quanto maior a resistência aerodinâmica, menor é o fluxo de evapotranspiração. A resistência aerodinâmica menor em florestas, onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento.

Tabela 14. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. (Fonte: FAN, 2011).

Parâmetro Calibráveis	Descrição
Capacidade de Armazenamento do Solo (W_m)	Capacidade de armazenamento de água no solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de W_m .
Vazão durante a estiagem (K_{bas})	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
Quantidade de água que esco subsuperficialmente (K_{int})	Parâmetro que controla a quantidade de água da camada de solo que esco subsuperficialmente.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP)	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Armazenamento Residual (W_c)	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Calibração da propagação superficial (CI)	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas minibacias. Representa o retardo do reservatório superficial.
Calibração da propagação subsuperficial (CS)	Parâmetro para calibração da propagação subsuperficial nas minibacias. Representa o retardo do reservatório subsuperficial.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.

Descrição do modelo MGB-IPH

O detalhamento dos processos hidrológicos simulados pelo modelo MGB-IPH apresentado nesse item é uma compilação da descrição do modelo apresentada originalmente por Collischonn (2001), atualizada recentemente nos trabalhos de Paiva (2009) e Sorribas (2011).

Processos Hidrológicos Verticais

Os processos verticais simulados pelo modelo MGB-IPH são: balanço de água no solo, interceptação, escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo incluindo a percolação de água

para o aquífero e o fluxo ascendente. A Figura 108 ilustra esses processos.

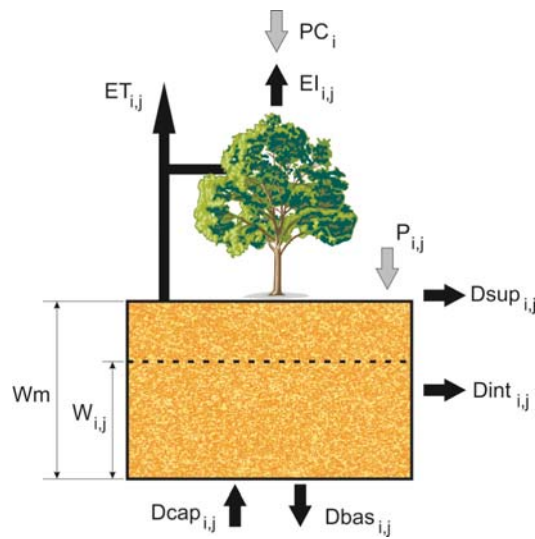


Figura 108. Balanço de água no solo para cada Unidade de Resposta Hidrológica – URH do modelo MGB-IPH (Fonte: Collischonn, 2001).

Interceptação

O processo de interceptação representa a retenção da precipitação antes de sua chegada ao solo. No modelo, esse processo é dependente da densidade de vegetação que cobre o solo, dado pelo Índice de área Foliar (IAF). O IAF representa a relação entre a área total das folhas das plantas pela área superficial do solo, podendo ser estimado através experimentos específicos. O volume máximo do reservatório de interceptação é dado pela Equação 26.

$$S_{\max_j} = \alpha \cdot IAF_j \quad (26)$$

onde S_{\max_j} (mm) é a capacidade do reservatório de interceptação do bloco j de uma minibacia qualquer; α (mm) parâmetro de lâmina de interceptação, que possui valor fixo igual a 0,2 mm e IAF_j (adimensional) é o índice de área foliar.

O balanço hídrico do reservatório de interceptação é dado pelas seguintes equações:

$$S_{i,j}^{t+1} = \min(S_{i,j}^t + PC_i, S_{\max_j}) \quad (27)$$

$$P_{i,j} = PC - (S_{i,j}^{t+1} + S_{i,j}^t) \quad (28)$$

$$S_{i,j}^{t+1} = S_{i,j}^{t+1} - EI_{i,j} \quad (29)$$

$$EI_{i,j} = \min(S_{i,j}^{t+1}, EPI_{i,j}) \quad (30)$$

onde $S_{i,j}$ (mm) é a lâmina d'água interceptada; $PC_{i,j}$ (mm) é precipitação sobre a cobertura vegetal na minibacia i ; $P_{i,j}$ (mm) é a precipitação que atinge o solo; $EI_{i,j}$ (mm) é a evaporação real da lâmina interceptada e $EPI_{i,j}$ (mm) é a evaporação potencial da lâmina interceptada, calculada pelo método de Penman-Monteith com o parâmetro de resistência superficial igual a zero.

Balanço de água no solo

O balanço de água no solo é calculado para cada unidade de resposta hidrológica (URH) de cada minibacia de forma independente. Somente a parcela da chuva que não é retida por interceptação, é contabilizada. A equação de balanço de água no solo é:

$$W_{i,j}^t = W_{i,j}^{t-1} + (P_{i,j} - ET_{i,j} - Dsup_{i,j} - Dint_{i,j} - Dbas_{i,j} + Dcap_{i,j}) \quad (31)$$

onde $W_{i,j}$ (mm) é o armazenamento na camada superficial do solo ao final do intervalo de tempo t na URH j da minibacia i ; $P_{i,j}$ (mm) precipitação que chega ao solo; $ET_{i,j}$ (mm) é a evapotranspiração da água no solo; $Dsup_{i,j}$ (mm) é o escoamento superficial (escoamento rápido); $Dint_{i,j}$ (mm) é o escoamento subsuperficial (drenagem lento); $Dbas_{i,j}$ (mm) é o escoamento subterrânea (escoamento muito lento); $Dcap_{i,j}$ (mm) é fluxo ascendente do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo.

Evapotranspiração

Para cálculo da evapotranspiração no modelo é utilizado o método de Penman-Monteith (Shuttleworth, 1993) dado pela Equação 32. De acordo com Paiva (2009), o método considera que a planta consegue se utilizar de toda a energia disponível para a evaporação. As resistências superficial (r_a) e aerodinâmica (r_s) dificultam a difusão do vapor d'água, respectivamente, para fora das folhas e para a atmosfera.

$$ET = \frac{fc}{\lambda \cdot \rho_w} \left[\frac{\Delta \cdot (S_n - L_n - G) + \rho_a \cdot c_p \left(\frac{e_s - e_d}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right] \quad (32)$$

onde ET ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) é a taxa de evapotranspiração da água; λ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) é o calor latente de vaporização; ρ_w ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) é a massa específica da água igual $1.000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_a ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) é a massa específica do ar; e_s (kPa) é a pressão de saturação do vapor; e_d (kPa) pressão do vapor; Δ ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$) é o gradiente da pressão de saturação do vapor em relação à temperatura; c_p ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$) calor específico do ar úmido, igual a $1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$; γ ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$) é a constante psicrométrica, igual a 0,66; S_n ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) radiação líquida de onda curta; L_n ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) radiação líquida de onda longa; G ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) é o fluxo de energia para o solo; r_s ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) é a resistência superficial da

vegetação; r_a (s.m-1) é a resistência aerodinâmica e fc é um fator de conversão de unidades igual a $3,6.10^{-6}$.

Geração do escoamento superficial

O escoamento superficial no modelo é aquele que efetivamente chega a rede de drenagem, sendo gerado somente em áreas saturadas da bacia. Para determinação da fração de área saturada é utilizada uma relação probabilística (Equação 33) entre a umidade do solo e a fração de área saturada apresentada por Moore & Clarke (1981).

$$X = 1 - \left(1 - \frac{W}{Wm} \right)^{\frac{b}{b+1}} \quad (33)$$

Onde X é a fração da área que está saturada; W (mm) é o volume de água armazenada no solo; Wm (mm) é a capacidade máxima de armazenamento de água no solo e b (adimensional) é um parâmetro que define o grau de heterogeneidade da capacidade de armazenamento de água no solo.

O escoamento superficial $Dsup$ entre dois intervalos de tempo consecutivos na minibacia i e na URH é calculada por:

$$\text{Se } A \leq 0, Dsup_{i,j} = \Delta t \cdot P_{i,j} - (Wm_j - W_{i,j}^{t-1}) \quad (34)$$

$$\text{Se } A > 0, Dsup_{i,j} = \Delta t \cdot P_{i,j} - (Wm_j - W_{i,j}^{t-1}) + Wm_j \cdot A^{b_j+1} \quad (35)$$

$$\text{Sendo } A = \left[\left(1 - \frac{W_{i,j}^{t-1}}{Wm_j} \right)^{\frac{1}{b_j+1}} - \frac{\Delta t \cdot P_{i,j}}{Wm_j \cdot (b_j + 1)} \right] \quad (36)$$

onde $P_{i,j}$ (mm) é precipitação efetiva e $Dsup_{i,j}$ (mm) é o escoamento superficial da URH j da minibacia i.

Escoamento Subsuperficial

O escoamento subsuperficial no modelo representa um escoamento mais rápido do que o subterrâneo e mais lento que o superficial. No modelo é utilizada uma relação não linear que relaciona a condutividade hidráulica do solo a sua textura, semelhante a apresentada por Brooks & Corey (Rawls et al., 1993).

$$Dint_{i,j} = Kint_j \cdot \left(\frac{W_{i,j}^{t-1} - Wz_j}{Wm_j - Wz_j} \right)^{3+\frac{2}{\lambda}} \quad (37)$$

onde $D_{int_{i,j}}$ (mm) é o volume de escoamento subsuperficial; Wz_j (mm) é o limite mínimo de armazenamento de água no solo para haver geração de escoamento subsuperficial; K_{int_j} (mm/dia) é um parâmetro de drenagem subsuperficial e λ (adimensional) é o índice de porosidade do solo.

Percolação para o aquífero

O volume percolado que chega ao aquífero, dado por $Dbas_{i,j}$, é representado por um relação linear do volume de água armazenado no solo (Equação 38).

$$Dbas_{i,j} = Kbas_j \cdot \left(\frac{W_{i,j}^{t-1} - Wc_j}{Wm_j - Wc_j} \right) \quad (38)$$

onde Wc_j (mm) é o limite mínimo a partir do qual não ocorre percolação e $Kbas_j$ (mm) um parâmetro que define a percolação máxima quando o solo está saturado.

Fluxo Ascendente

No modelo é possível considerar o movimento da água no sentido aquífero - zona não saturada. Esse fenômeno pode ocorrer devido a diferenças de potencial ou mesmo pela existência de vegetação com raízes profundas, capaz de retirar água do aquífero (Paiva, 2009). O fluxo ascendente $Dcap$ é definido nas rotinas do modelo como:

$$Dcap_{i,j} = DMcap_j \cdot \left(\frac{Wc_j - W_{i,j}^{t-1}}{Wc_j} \right) \quad (39)$$

onde Wc_j (mm) é o limite máximo para haver fluxo ascendente e $DMcap$ (mm) o máximo fluxo ascendente do solo.

Processos hidrológicos horizontais

Propagação nas minibacias

O escoamento na superfície da bacia é representado no modelo atrás de três reservatórios lineares (superficial, subsuperficial e subterrâneo). Esses reservatórios têm a função de retardar e amortecer os hidrogramas antes de sua chegada à rede de drenagem, onde são propagados. Os volumes armazenados nos três reservatórios são:

$$V \sup_i^{t'} = V \sup_i^{t-1} + \Delta t \cdot \sum_j D \sup_{i,j} \quad (40)$$

$$V \text{int}_i^{t'} = V \text{int}_i^{t-1} + \Delta t \cdot \sum_j D \text{int}_{i,j} \quad (41)$$

$$Vbas_i^{t'} = Vbas_i^{t-1} + \Delta t \cdot \left(\sum_j Dbas_{i,j} - \sum_j Dcap_{i,j} \right) \quad (42)$$

onde $Vsup_i$ (m^3) é o volume no reservatório superficial; $Vint_i$ (m^3) é o volume no reservatório subsuperficial; $Vbas_i$ (m^3) é o volume no reservatório subterrâneo; i se refere as minibacias, j as URHs e $t-1$ é o início do intervalo de tempo.

A vazão de saída dos reservatórios é calculada como uma função linear do armazenamento e dados pelas seguintes equações:

$$Qsup_i = \frac{1}{TKS_i} \cdot Vsup_i^{t'} \quad (43)$$

$$Qint_i = \frac{1}{TKI_i} \cdot Vint_i^{t'} \quad (44)$$

$$Qbas_i = \frac{1}{TKB_i} \cdot Vbas_i^{t'} \quad (45)$$

onde $Qsup_i$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) é a vazão de saída do reservatório superficial; $Qint_i$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) é a vazão de saída do reservatório subsuperficial; $Qbas_i$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) é a vazão de saída do reservatório subterrâneo; TKS_i (s) é o tempo de retardo do reservatório superficial; TKI_i (s) é o tempo de retardo do reservatório subsuperficial e $TKBi$ (s) é o tempo de retardo do reservatório subterrâneo.

Os tempos de retardo, mostrados nas Equações 46 e 47, a seguir, são calculados em função do tempo de concentração da minibacia, dado por Tc (s), e dos parâmetros calibráveis CS e CI que são adimensionais.

$$TKS_i = CS \cdot Tc_i \quad (46)$$

$$TKI_i = CI \cdot Tc_i \quad (47)$$

O tempo de concentração Tc é calculado pela fórmula de Kirpich:

$$Tc_i = a \frac{L_i^b}{S_i^c} \quad (48)$$

onde Tc (s) é o tempo de concentração da minibacia; L (km) é o comprimento do rio principal; S ($m \cdot m^{-1}$) é a declividade do rio principal e a , b e c são parâmetros com valores iguais a, respectivamente, 239,04, 0,77 e 0,385.

A vazão que chega aos trechos de rio de cada uma das minibacias ($Qmini$) é dada pela soma das contribuições superficial, subsuperficial e subterrânea (Equação 49).

$$Q_{\text{mini}_i} = Q_{\text{sup}_i} + Q_{\text{int}_i} + Q_{\text{bas}_i} \quad (49)$$

onde Q_{sup_i} ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) vazão de saída do reservatório superficial; Q_{int_i} ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) vazão de saída do reservatório subsuperficial; Q_{bas_i} ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) vazão de saída do reservatório subterrâneo e Q_{mini_i} ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) vazão de saída da minibacia.

Propagação das vazões na rede de drenagem

A propagação de vazão nos trechos de rio no modelo é realizada utilizando-se o método de Muskingum Cunge, como descrito por Tucci (1998). O método relaciona a vazão de saída de um trecho de rio em um determinado intervalo de tempo, as vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e a vazão de entrada no intervalo de tempo atual, como mostra a equação a seguir.

$$Q_{i+1}^{t+1} = C1.Q_i^t + C2.Q_i^{t+1} + C3.Q_{i+1}^t \quad (50)$$

onde Q ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) é a vazão; $i+1$ e i são as seções de montante e jusante de determinado subtrecho de rio e t e $t+1$ o início e o final do intervalo de tempo, respectivamente. Os coeficientes $C1$, $C2$ e $C3$ são estimados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média dos trechos de rio, através das seguintes equações:

$$C1 = \frac{2.K.X + \Delta t}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad (51)$$

$$C2 = \frac{\Delta t - 2.K.X}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad (52)$$

$$C3 = \frac{2.K.(1-X) - \Delta t}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad (53)$$

Sendo

$$K = \frac{\Delta t}{c_0} \quad (54)$$

$$X = 0,5 - \frac{Q_0}{B.S_0.c_0.\Delta x} \quad (55)$$

onde X (adimensional) é o parâmetros de espaço; K (s) é o parâmetros de tempo e Δx (m) é o comprimento do subtrecho de rio; Q_0 ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) é a vazão de referência para estimativa dos parâmetros, c_0 ($\text{m}.\text{s}^{-1}$) é a celeridade cinemática; B_0 (m) é a largura do rio e S_0 ($\text{m}.\text{m}^{-1}$) é a declividade do trecho de rio.

Para simplificar a obtenção de parâmetros do método de Muskingum-Cunge, a vazão de referência Q_0 e a largura do rio B_0 são determinadas com base em relações geomorfológicas que

utilizam a área de drenagem acumulada da minibacia de montante ao trecho de rio para estimativa dos parâmetros. O comprimento total do trecho de rio e a declividade são obtidos a partir do MDE e celeridade cinemática é obtida pela equação de Manning para um canal retangular (Equação 56).

$$c_0 = \frac{5}{3} \cdot \frac{Q_0^{0,4} \cdot S_0^{0,3}}{\eta^{0,6} \cdot B_0} \quad (56)$$

onde η é o coeficiente de Manning. O valor padrão adotado pelo modelo é 0,035.

As discretizações temporal e espacial são definidas pelas Equações 57 e 58, com o objetivo de minimizar os erros numéricos.

$$\Delta t \leq \frac{Tr}{M} \quad (57)$$

$$\Delta x \leq 0,5 \cdot \Delta t \cdot \left[1 + \left(1 + \frac{3 \cdot Q_0}{2 \cdot B_0 \cdot c_0^2 \cdot S_0 \cdot \Delta t} \right) \right] \quad (58)$$

onde TR (s) é o tempo de subida da onda de cheia e $M \geq 5$.

A propagação do escoamento é realizada somente em minibacias que não são de cabeceira. A condição de contorno em cada minibacia é, assim, a vazão de saída das minibacias de montante somada as vazões de saída de cada um dos reservatórios lineares da própria minibacia. As minibacias de cabeceira são caracterizadas no modelo como aquelas que não possuem minibacias à montante. A Figura 109, a seguir, ilustra a metodologia para geração e propagação do escoamento superficial e na rede de drenagem pelo modelo.

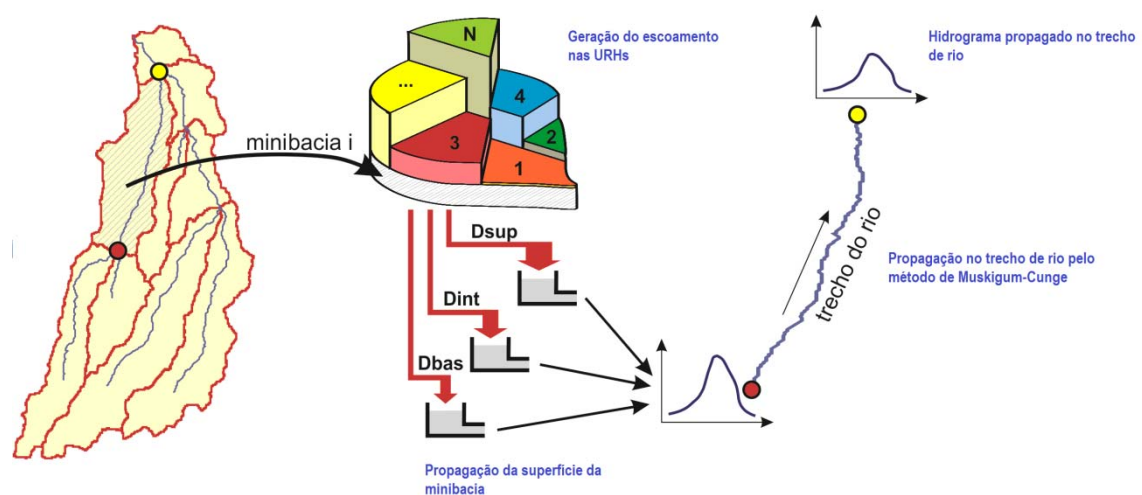


Figura 109. Metodologia de geração e propagação do escoamento na superfície da minibacia e na rede de drenagem no MGB-IPH.

Anexo 2

Tabela 15. Postos pluviométricos (rede telemétrica) utilizados na aplicação do modelo MGB-IPH na bacia do Paraopeba.

Posto	Longitude (graus)	Latitude (graus)
AVH – 40	-43,803	-20,224
Buritizeiro	-45,037	-17,404
Cajuru	-44,753	-20,239
Fazenda Campo Grande	-44,437	-20,626
Fazenda das Pedras	-45,105	-18,017
Fazenda das Vertentes	-43,690	-20,233
Fazenda Maracuja	-43,701	-20,267
Gafanhoto	-44,833	-20,117
Igarape	-44,292	-19,968
Iguatama Montante	-45,715	-20,173
Major Porto	-46,040	-18,706
Pari – Copasa	-44,898	-20,167
Pirapora - Ponte	-44,942	-17,368
Ponte – BR 040	-45,461	-18,109
Ponte dos Vilelas	-44,630	-20,404
Porto Andorinhas	-45,288	-19,281
Porto Indaia	-45,630	-18,677
Porto do Mesquita	-44,702	-19,173
Porto Para	-45,109	-19,287
Ponte Nova do Paraopeba	-44,305	-19,948
Quartel_Geral	-45,570	-19,288
Rio de Pedras	-43,731	-20,214
São Roque de Minas	-46,572	-20,195
SE – Barreiro	-43,991	-19,999
SE – Conselheiro Lafaiete	-43,821	-20,664
SE – Curvelo	-44,394	-18,742
SE – Ouro Preto	-43,500	-20,367
SE – Pitangui	-44,896	-19,680
Sete Lagoas - EFAP	-44,258	-19,451
Tres Marias	-45,259	-18,215
Tres Marias Jusante	-45,252	-18,187
Vargem Bonita	-46,370	-20,340
Varzea da Palma	-44,713	-17,595
Varzea da Palma - Ponte	-44,714	-17,594

Tabela 16. Postos pluviométricos convencionais da ANA utilizados na validação dos dados horários.

Código	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Nome
01744009	-17,594	-44,716	Várzea da palma
01744010	-17,890	-44,577	Lassance
01745000	-17,146	-45,880	Caatinga
01745001	-17,111	-45,438	Cachoeira do Paredão
01745007	-17,027	-45,541	Porto do Cavalo
01746001	-17,031	-46,014	Porto da Extrema
01746002	-17,255	-46,474	Santa Rosa
01746006	-17,664	-46,355	Ponte da BR-040 – Prata
01746007	-17,503	-46,572	Ponte da BR-040 – Paracatu
01843000	-18,636	-43,966	Usina Parauna
01843002	-18,466	-43,743	Gouveia
01843020	-18,083	-43,833	São João da Chapada
01844001	-18,300	-44,223	Santo Hipólito
01844002	-18,367	-44,450	Corinto
01844004	-18,762	-44,404	Granja Santa Branca
01844009	-18,644	-44,048	Presidente Juscelino – jusante
01844010	-18,671	-44,191	Ponte do Licínio – jusante
01844017	-18,372	-44,444	Corinto
01844018	-18,201	-44,577	Ponte do Bicudo
01844019	-18,542	-44,599	Morro da Garça
01844024	-18,750	-44,900	Felixlândia
01845013	-18,344	-45,837	São Gonçalo do Abaeté
01845014	-19,000	-45,966	Tiros
01845027	-17,958	-45,102	Barra do Rio de Janeiro
01845032	-18,283	-45,000	Andrequice - Três Marias
01846002	-18,930	-46,967	Charqueada do Patrocínio
01846003	-18,707	-46,037	Major Porto
01846004	-18,850	-46,801	Guimaranã
01846005	-18,413	-46,422	Presidente Olegário
01846006	-18,559	-46,800	Pantano
01846007	-18,841	-46,551	Santana de Patos
01846015	-18,005	-46,911	Vazante
01846016	-18,034	-46,419	Ponte Firme
01846017	-18,641	-46,334	Leal de Patos
01846019	-18,374	-46,915	Rocinha
01846023	-18,183	-46,804	Lagamar
01846031	-18,150	-46,133	Andrequice
01943004	-19,521	-43,744	Jaboticatubas
01943006	-19,893	-43,815	Sabará

Código	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Nome
01943009	-19,687	-43,921	Vespasiano
01943010	-19,901	-43,668	Caeté
01943022	-19,945	-43,913	Caixa de Areia
01943023	-19,664	-43,688	Taquaraçu
01943024	-19,690	-43,586	José de Melo
01943042	-19,120	-43,838	Fazenda Caraibas
01943049	-19,561	-43,918	Ponte Raul Soares
01944004	-19,956	-44,307	Ponte Nova do Paraopeba
01944007	-19,880	-44,422	Fazenda Escola Florestal
01944009	-19,634	-44,053	Pedro Leopoldo
01944010	-19,268	-44,402	Horto Florestal
01944011	-19,728	-44,807	Jaguaruna – jusante
01944020	-19,013	-44,037	Pirapama
01944021	-19,696	-44,929	Velho da Taipa
01944024	-19,237	-44,123	Fazenda Vargem Bonita
01944026	-19,964	-44,452	Barro Preto
01944027	-19,956	-44,334	Juatuba
01944031	-19,423	-44,548	Ponte da Taquara
01944032	-19,684	-44,879	SE Pitangui
01944048	-19,992	-44,424	Mateus Leme
01944049	-19,428	-44,720	Papagaios
01944055	-19,973	-44,188	Betim – Copasa
01944059	-19,563	-44,447	Fortuna de Minas
01944062	-19,983	-44,492	Fazenda Santa Rita
01944063	-19,087	-44,947	Silva Campos
01944068	-19,029	-44,194	Fazenda Capão do Gado
01945002	-19,395	-45,884	Barra do Funchal
01945004	-19,752	-45,117	Estação Alvaro da Silveira
01945008	-19,743	-45,255	Bom Despacho
01945019	-19,469	-45,602	Dores do Indáia (CVSF)
01945035	-19,163	-45,443	Abaeté
01945037	-19,666	-45,652	Taquaral
01945038	-19,279	-45,286	Porto das Andorinhas
01945039	-19,332	-45,228	Martinho Campos
01946000	-19,879	-46,033	Tapiraí – jusante
01946004	-19,475	-46,542	Ibiá
01946005	-19,071	-46,796	Salitre
01946007	-19,517	-46,571	Fazenda São Mateus
01946008	-19,113	-46,688	Serra do Salitre
01946009	-19,315	-46,044	São Gotardo

Código	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Nome
01946010	-19,751	-46,412	Pratinha
01946011	-19,927	-46,825	Tapira
01946017	-19,349	-46,833	Ponte BR-146
01946018	-19,323	-46,637	Ponte do rio São João
01946019	-19,675	-46,683	Argenita
01946020	-19,531	-46,100	São José da Bela Vista
01946022	-19,003	-46,306	Carmo do Paranaíba
02043002	-20,179	-43,943	Lagoa Grande (MMV)
02043004	-20,138	-43,893	Rio do Peixe (MMV)
02043005	-20,665	-43,778	Conselheiro Lafaiete
02043009	-20,363	-43,144	Acaiaca – jusante
02043010	-20,691	-43,299	Piranga
02043011	-20,390	-43,180	Fazenda Paraíso
02043013	-20,522	-43,830	Congonhas – linigrafo
02043014	-20,670	-43,088	Porto Firme
02043018	-20,956	-43,801	Carandaí
02043025	-20,517	-43,017	Usina da Brecha
02043026	-20,848	-43,242	Braz Pires
02043027	-20,286	-43,099	Fazenda Ocidente
02043042	-20,165	-43,892	Represa das Codornas (MMV)
02043043	-20,126	-43,950	Represa do Miguelão (MMV)
02043056	-20,305	-43,616	Fazenda Água Limpa – jusante
02043060	-20,301	-43,798	Itabirito – linigrafo
02044002	-20,071	-44,570	Itaúna – montante
02044003	-20,192	-44,794	Carmo do Cajuru
02044006	-20,137	-44,892	Divinópolis
02044007	-20,661	-44,071	Entre Rios de Minas
02044008	-20,198	-44,121	Melo Franco
02044009	-20,625	-44,433	Fazenda Campo Grande
02044012	-20,043	-44,043	Ibirité
02044016	-20,169	-44,515	Fazenda Benedito Chaves
02044019	-20,051	-44,452	Fazenda Vista Alegre
02044020	-20,068	-44,492	Calambau
02044021	-20,106	-44,401	Alto da Boa Vista
02044024	-20,008	-44,331	Fazenda Currealinho
02044026	-20,130	-44,474	Fazenda Coqueiros
02044027	-20,741	-44,783	Ponte Fernão Dias
02044037	-20,944	-44,908	Santo Antônio do Amparo
02044038	-20,924	-44,238	Resende Costa
02044040	-20,635	-44,049	Usina João Ribeiro

Código	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Nome
02044041	-20,102	-44,485	Fazenda Laranjeiras
02044042	-20,563	-44,868	Carmo da Mata (ETA - COPASA)
02044043	-20,000	-44,462	Estiva
02044047	-20,024	-44,468	Serra da Saudade
02044050	-20,897	-44,500	São Tiago
02044052	-20,045	-44,408	Jardim
02044053	-20,069	-44,345	Escola de Veterinária
02044054	-20,087	-44,427	Serra Azul
02045001	-20,021	-45,966	Bambui
02045002	-20,179	-45,700	Iguatama
02045004	-20,905	-45,125	Santana do Jacaré
02045005	-20,472	-45,036	Lamounier
02045010	-20,295	-45,543	Arcos (COPASA)
02045011	-20,037	-45,535	Lagoa da Prata
02045012	-20,462	-45,945	Pium-i
02045013	-20,084	-45,297	Santo Antônio do Monte
02045020	-20,760	-45,274	Candéias
02045021	-20,457	-45,419	Formiga
02045026	-20,945	-45,824	Ilicínea
02045028	-20,765	-45,926	Guapé
02046001	-20,739	-46,735	Itaú de Minas
02046007	-20,102	-46,055	Fazenda Ajudas
02046009	-20,348	-46,846	Delfinópolis
02046011	-20,812	-46,808	Usina Santana
02046013	-20,330	-46,366	Vargem Bonita
02046025	-20,148	-46,285	Fazenda Samburá
02046026	-20,250	-46,367	São Roque de Minas
02046027	-20,676	-46,324	UHE Furnas – MET
02046028	-20,965	-46,152	Carmo do Rio Claro
02046030	-20,654	-46,216	Ponte do Turvo
02046031	-20,750	-46,743	Itaú de Minas
02144000	-21,034	-44,772	Bom Sucesso
02144001	-21,947	-44,194	Bom Jardim de Minas
02144002	-21,123	-44,233	Porto Tiradentes
02144003	-21,990	-44,939	Caxambu
02144004	-21,951	-44,876	Baependi
02144005	-21,321	-44,873	Itumirim
02144006	-21,507	-44,916	Luminarias
02144007	-21,492	-44,326	Madre de Deus de Minas
02144009	-21,165	-44,136	Porto do Elvas

Código	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Nome
02144010	-21,699	-44,439	São Vicente de Minas
02144016	-21,987	-44,032	Tabuão
02144018	-21,977	-44,603	Aiuruoca
02144019	-21,735	-44,312	Andrelândia
02144020	-21,056	-44,209	Usina São João Del Rei
02144021	-21,675	-44,341	Fazenda Laranjeiras
02144022	-21,746	-44,355	Fazenda Paraíba
02144023	-21,143	-44,738	Ibituruna
02144024	-21,189	-44,329	Vila Rio das Mortes
02144025	-21,998	-44,464	Carvalhos
02144026	-21,145	-44,914	Macaia
02144037	-21,835	-44,801	Cruzília
02144038	-21,484	-44,643	Carrancas
02144039	-21,298	-44,629	SE Itutinga

Tabela 17. Estações meteorológicas do INMET com dados de normais climatológicas utilizadas.

Código	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Nome
00083479	-17,233	-46,883	Paracatu
00083483	-17,350	-44,917	Pirapora
00083481	-17,700	-46,167	João Pinheiro
00083538	-18,250	-43,600	Diamantina
00083531	-18,517	-46,433	Patos de Minas
00083536	-18,750	-44,450	Curvelo
00083539	-18,950	-47,000	Patrocínio
00083589	-19,017	-43,433	Conceição do Mato Dentro
00083570	-19,217	-45,000	Pompéu
00083586	-19,467	-44,250	Sete Lagoas
00083579	-19,600	-46,933	Araxá
00083590	-19,617	-43,217	Itabira
00083591	-19,833	-43,117	João Monlevade
00083581	-19,883	-44,417	Florestal
00083587	-19,933	-43,933	Belo Horizonte
00083632	-20,017	-44,050	Ibirité
00083582	-20,033	-46,000	Bambuí
00083637	-20,683	-44,817	Oliveira
00083023	-21,233	-45,000	Lavras-ESAL,
00083688	-21,300	-44,267	São João Del-Rei
00083689	-21,250	-43,767	Barbacena
00083657	-21,317	-46,367	Fazenda Monte Alegre

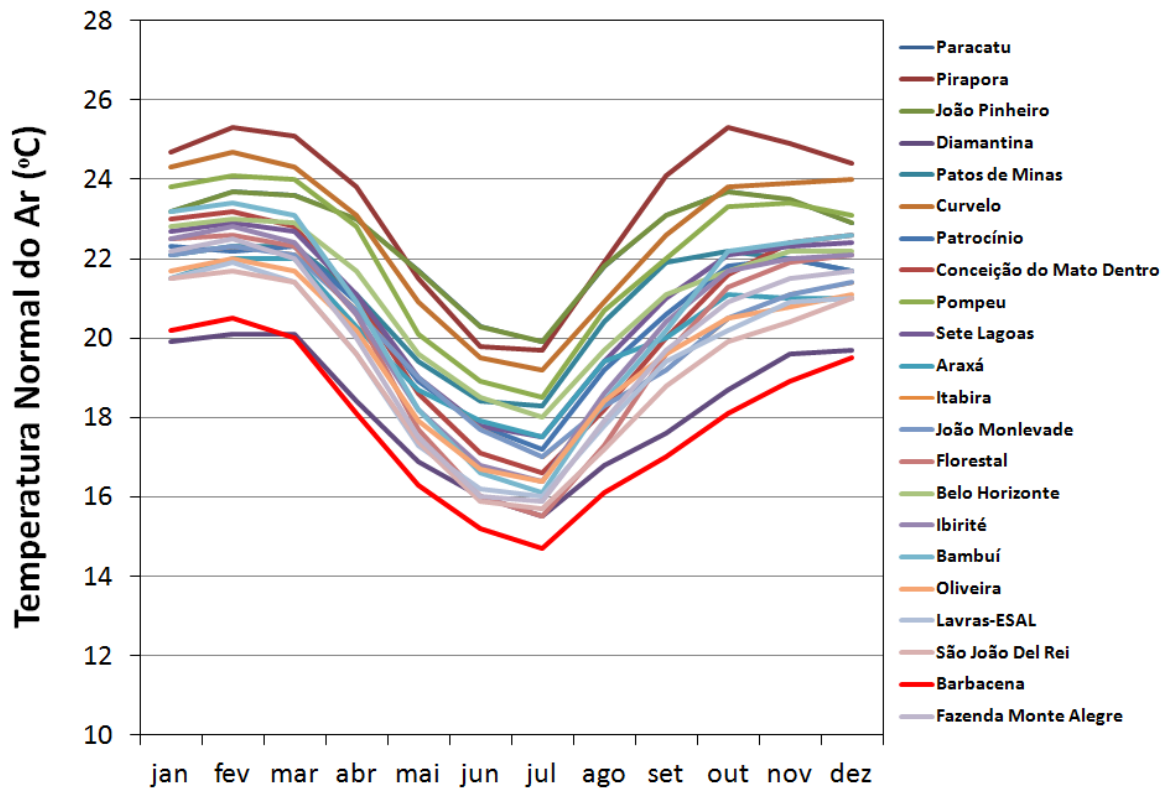


Figura 110. Temperatura Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.

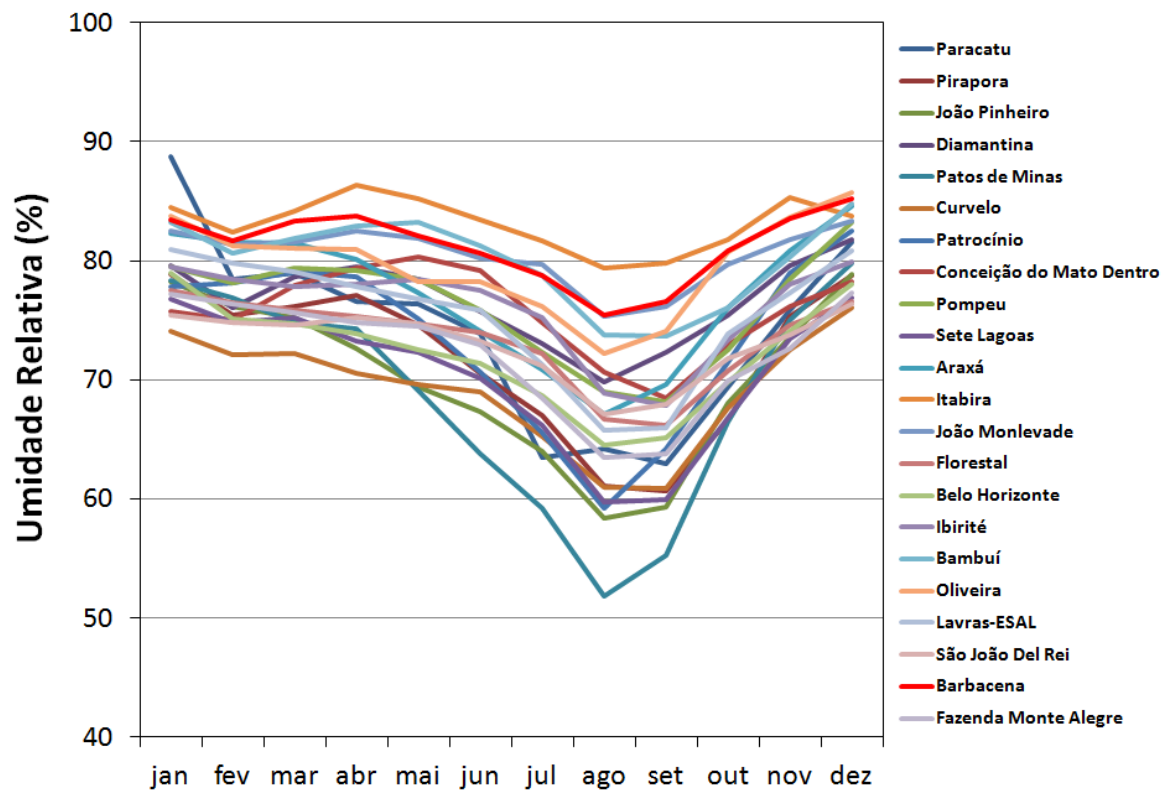


Figura 111. Umidade Relativa Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.

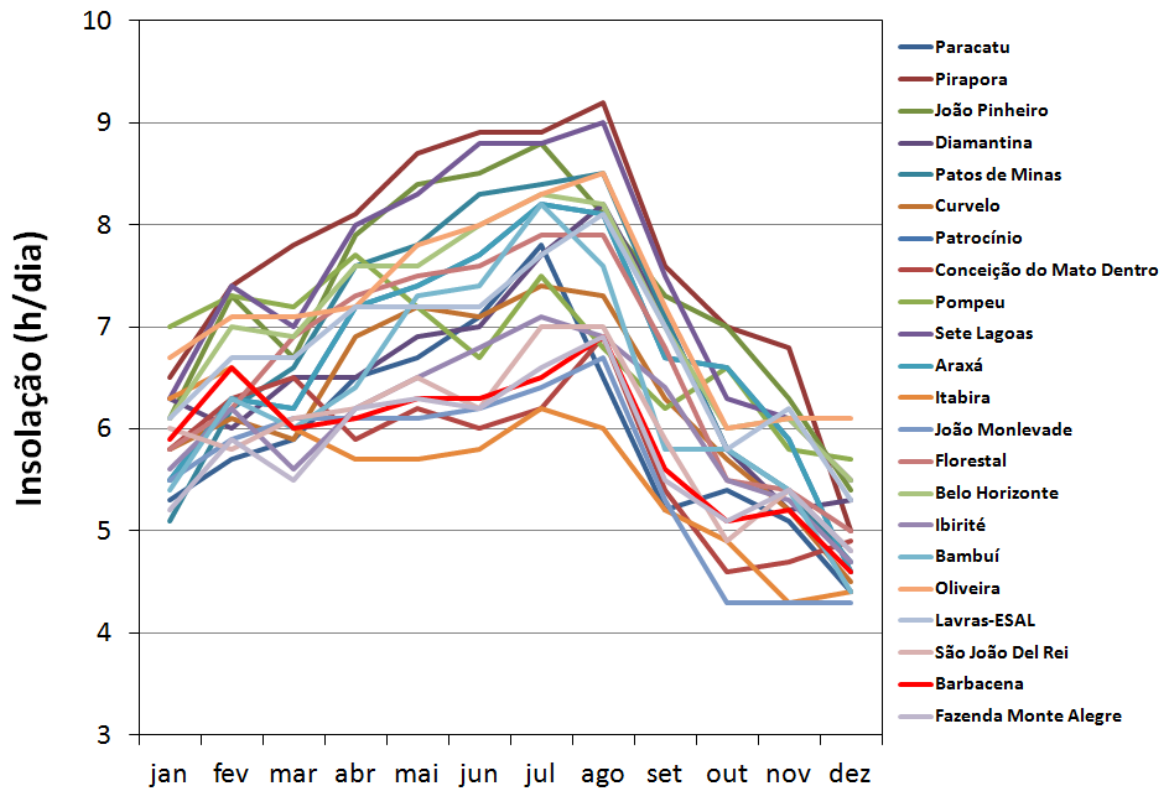


Figura 112. Insolação Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.

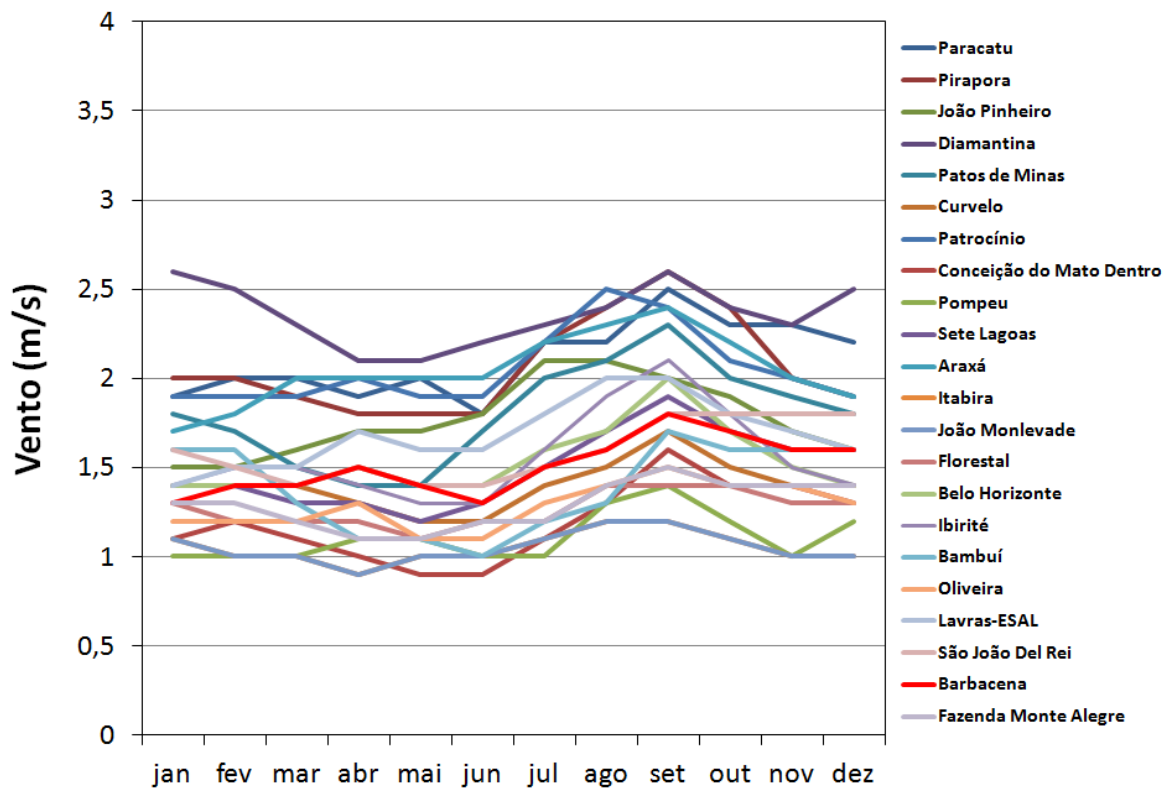


Figura 113. Velocidade do Vento Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.

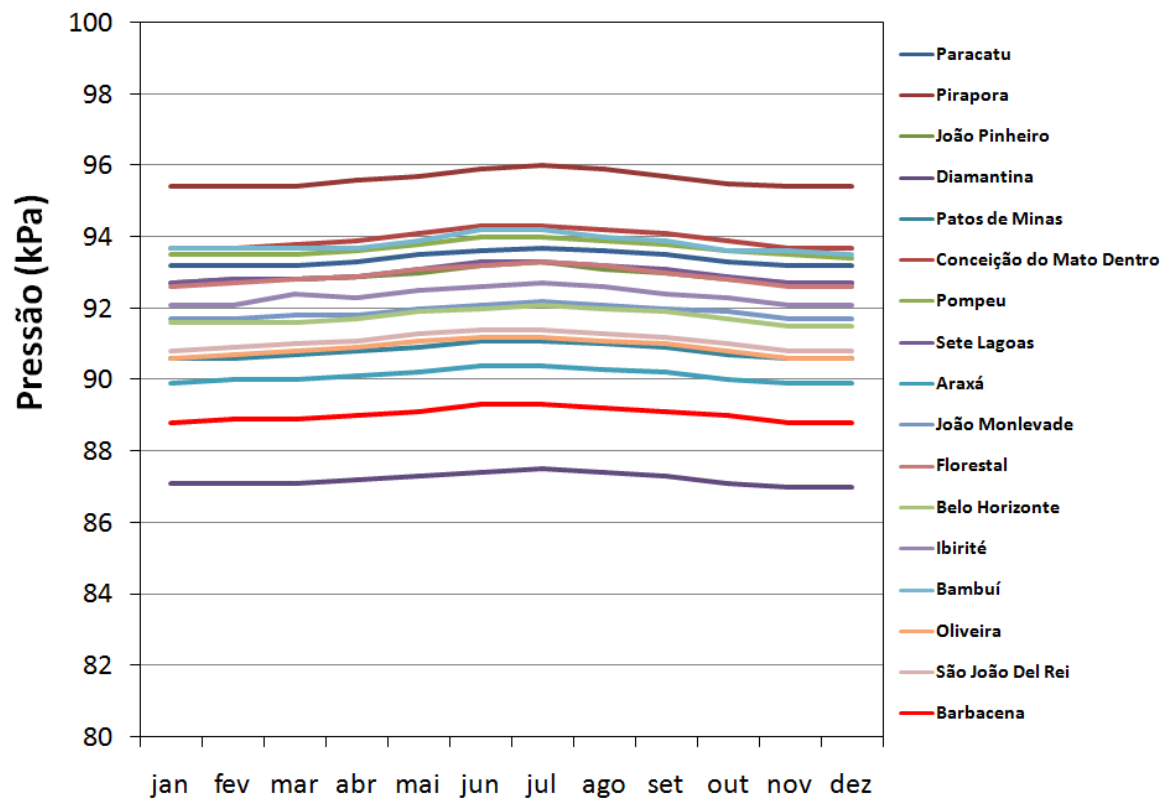


Figura 114. Pressão Atmosférica Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico.

Anexo 3

Tabela 18. Características dos modelos meteorológicos utilizados na pesquisa.

Modelo/Instituição	Descrição	Resolução	Instituição	site
ACOP1 (CPTEC-INPE)	Modelo T126 acoplado com modelo oceânico	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
B_UBA_LF1 (BRAMS-UBA)	Modelo BRAMS	80km	Grupo de Modelado em Mesoscala/UBA	https://www.bramsuba.com.ar/
BARCA (MASTER-USP)	Modelo BRAMS para o experimento BARCA	30km	Laboratório MASTER/IAG-USP	http://www.master.iag.usp.br/
BRA20 (CPTEC-INPE)	Modelo BRAMS inicializado com o modelo global do CPTEC	20km	Centro de Pesquisas Espaciais/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
CNCEP (INCEP)	Conjunto médio do modelo do INCEP	1°	National Centers for Environmental Prediction/NOAA	https://www.ncep.noaa.gov/
CPTEC (CPTEC-INPE)	Modelo global T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
ETA20 (CPTEC-INPE)	Modelo ETA	20km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
ETAac (CPTEC-INPE)	Conjunto controle do ETA	40km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
ETAm2 (CPTEC-INPE)	Membro 2 do Conjunto do ETA	40km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
ETAm3 (CPTEC-INPE)	Membro 3 do Conjunto do ETA	40km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
ETAm4 (CPTEC-INPE)	Membro 4 do Conjunto do ETA	40km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
ETARE (SAMU_ARG)	Modelo ETA, não-hidrostático, com parametrização Betts-Miller-Janjic	30km	Servicio Meteorologico Nacional - Argentina	https://www.smn.gov.ar/
ETA (CPTEC-INPE)	Modelo ETA	40km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
GFSDS (INCEP)	Modelo global do INCEP	0.5°	National Centers for Environmental Prediction	https://www.ncep.noaa.gov/
GP213 (CPTEC-INPE)	Modelo GPSAS com análise do CPTEC	63km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
GRUMA (GRUMA-UFSM)	Modelo BRAMS	20km	Grupo de Modelagem Atmosférica de Santa Maria/INPE-UFSM	http://www.mar.mil.br/dfm/cfm/meteor/index.htm
HRM_LF1 (CHM)	Modelo Alemão (HRM)	18km	Servicio Meteorologico Marinho - Brasil	https://www.cptec.inpe.br/
OLAMC (CPTEC-INPE)	Modelo OLAM 3.0 com microfísica de nível 1	125km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
RAMSC (MASTER-USP)	Modelo BRAMS inicializado com o modelo global do CPTEC	25km	Laboratório MASTER/IAG-USP	https://www.cptec.inpe.br/
RPSAS (CPTEC-INPE)	Modelo ETA com assimilação de dados observados	40km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF01N (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF01P (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF02M (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF02NP (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF03MP (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF04M (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF04P (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF05M (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF05P (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF06M (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF06P (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF07M (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SF07P (CPTEC-INPE)	Membro - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
SFAVM (CPTEC-INPE)	Membro de controle - Conjunto do modelo T126	100km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
T243 (CPTEC-INPE)	Modelo global T213	63km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
T299 (CPTEC-INPE)	Modelo global T299	44km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://www.cptec.inpe.br/
WRIFAR (CIMA-UBA)	Modelo WRF	60km	Centro de Previsão de Tempo e Pesquisas Climáticas/INPE	https://wrf.cima.fcem.uba.ar/
WRFmg (SIMGE-IGAM)	Modelo WRF - Projeto em parceria com MCT, SBMET e LPM	9km	Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais/IGAM	http://www.simge.gov.br/simge/index.html

Anexo 4

Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH

Tabela 19. Albedo para a bacia do rio Paraopeba.

UHR*	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
2	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
3	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
4	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
5	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
6	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
7	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
8	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

*1 = Agricultura em solo profundo; 2 = Campos em solo profundo; 3 = Floresta em solo profundo; 4 = Agricultura em solo médio; 5 = Campos em solo médio; 6 = Floresta em solo médio; 7 = Áreas impermeáveis; 8 = Água.

Tabela 20. Índice de Área Foliar (IAF) para a bacia do rio Paraopeba.

UHR*	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*1 = Agricultura em solo profundo; 2 = Campos em solo profundo; 3 = Floresta em solo profundo; 4 = Agricultura em solo médio; 5 = Campos em solo médio; 6 = Floresta em solo médio; 7 = Áreas impermeáveis; 8 = Água.

Tabela 21. Altura média da vegetação para a bacia do rio Paraopeba.

UHR*	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
3	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
6	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

*1 = Agricultura em solo profundo; 2 = Campos em solo profundo; 3 = Floresta em solo profundo; 4 = Agricultura em solo médio; 5 = Campos em solo médio; 6 = Floresta em solo médio; 7 = Áreas impermeáveis; 8 = Água.

Tabela 22. Resistência superficial em boas condições de umidade do solo para a bacia do rio Paraopeba.

UHR*	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
2	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
3	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
4	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
5	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
6	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
7	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*1 = Agricultura em solo profundo; 2 = Campos em solo profundo; 3 = Floresta em solo profundo; 4 = Agricultura em solo médio; 5 = Campos em solo médio; 6 = Floresta em solo médio; 7 = Áreas impermeáveis; 8 = Água.

Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH

Tabela 23. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH para a Subacia 1 – Estação Ponte Nova do Paraopeba.

UHR*	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
1	313	0,20	0,78	4,72	0,6	0	0
2	313	0,20	0,78	4,72	0,6	0	0
3	313	0,20	0,78	4,72	0,6	0	0
4	250	0,26	1,99	4,72	0,6	0	0
5	250	0,26	1,99	4,72	0,6	0	0
6	250	0,26	1,99	4,72	0,6	0	0
7	20	0,26	1,99	4,72	0,6	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
CS	12						
CI	120						
CB	4000						
QB (m³/s.km²)	0,01						

*1 = Agricultura em solo profundo; 2 = Campos em solo profundo; 3 = Floresta em solo profundo; 4 = Agricultura em solo médio; 5 = Campos em solo médio; 6 = Floresta em solo médio; 7 = Áreas impermeáveis; 8 = Água.

Tabela 24. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH para a Subacia 2 – Estação Porto do Mesquita.

UHR*	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
1	710	0,18	0,93	1,91	0,6	0	0
2	710	0,18	0,93	1,91	0,6	0	0
3	710	0,18	0,93	1,91	0,6	0	0
4	164	0,45	2,02	1,91	0,6	0	0
5	164	0,45	2,02	1,91	0,6	0	0
6	164	0,45	2,02	1,91	0,6	0	0
7	20	0,45	2,02	1,91	0,6	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
CS	4,41						
CI	172						
CB	2426						
QB (m³/s.km²)	0,01						

*1 = Agricultura em solo profundo; 2 = Campos em solo profundo; 3 = Floresta em solo profundo; 4 = Agricultura em solo médio; 5 = Campos em solo médio; 6 = Floresta em solo médio; 7 = Áreas impermeáveis; 8 = Água.

Anexo 5

a) Caracterização dos períodos chuvosos

a.1) Ano hidrológico 2008-2009

Dentre os três períodos chuvosos analisados, o ocorrido entre os anos de 2008 e 2009 foi o que apresentou os maiores eventos hidrológicos em termos de magnitude das vazões. A Figura 115, apresenta os hidrogramas observados e calculados com o modelo hidrológico durante o período chuvoso (out-abr), as vazões limites e a precipitação média observada na bacia definida pela estação Porto do Mesquita. Observa-se, nessa figura, uma tendência de superestimativa das vazões simuladas pelo modelo (linha na cor cinza), especialmente entre os dias 12/12/2008 e 13/01/2009.

Os primeiros eventos de cheia observados ocorreram no início do mês de novembro de 2008. São eventos de pequena magnitude, com vazões de pico próximas a Q20%. A partir do dia 15/12/2008, as precipitações se intensificaram, sendo observados, entre os dias 16 e 17/12/2008, volumes totais acumulados em um dia próximos a 150mm na região sul da bacia (Figura 116). Em virtude dessas precipitações, as vazões na estação Porto do Mesquita aumentaram continuamente a partir do dia 16/12/2008, ultrapassando todas as vazões limites até alcançar a vazão de 1366 m³/s (TR~46 anos) em 22/12/2008 18:00 UTC, a maior vazão observada em toda a série de dados horários disponível (2000-2011). Em um período subsequente, as vazões na estação fluviométrica diminuíram, voltando novamente a aumentar a partir do dia 28/12/2008. Em 02/01/2009, a vazão atingiu cerca de 900m³/s (TR~3,5 anos), caracterizando o segundo maior evento de cheia observado nesse período chuvoso. Após esse evento, as vazões no Rio Paraopeba diminuíram, tendo sido observados, no restante do período chuvoso, dois eventos com vazões de pico superiores a Q5%, ocorridos nos dias 23/01/2009 e 17/02/2009, com tempos de retorno inferiores a um ano.

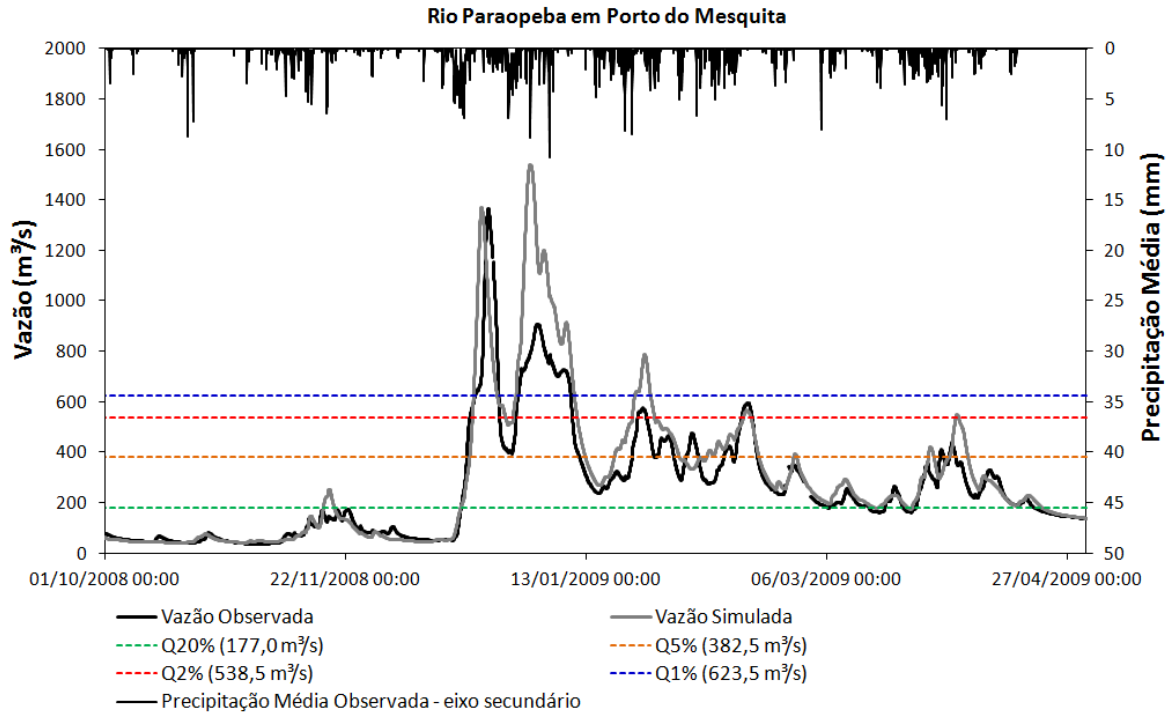
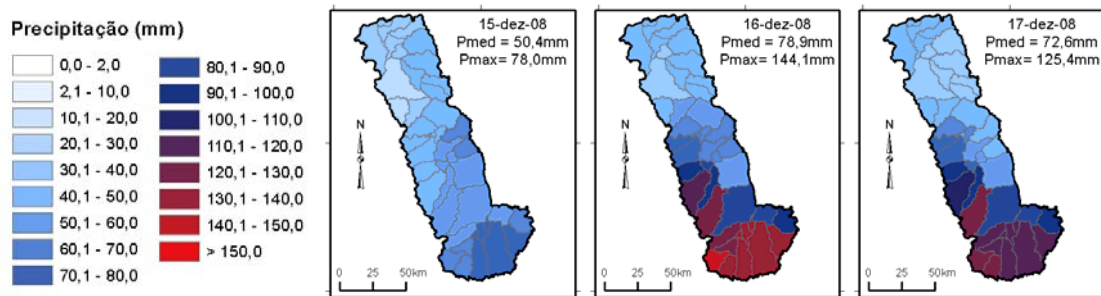


Figura 115. Vazões observadas e simuladas e precipitação média na bacia até Porto do Mesquita no período chuvoso (out-abr) do ano hidrológico 2008-2009.



Pmed=precipitação média na bacia acumulada em um dia (01 - 00 UTC);
 Pmax=precipitação máxima acumulada em um dia (01 - 00 UTC);
 Precipitação média na bacia acumulado entre os dias 15 e 17/12/08= 201,9mm.

Figura 116. Precipitação observada na bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita no período entre 15/12/2008 e 17/12/2008.

a.2) Ano hidrológico 2009-2010

A Figura 117 apresenta as vazões observadas e calculadas pelo modelo durante o período chuvoso 2009-2010. Nesse período a simulação dos hidrogramas mostra ajustes significativamente melhores que no período 2008-2009, podendo-se observar, alternadamente, períodos com superestimativas e subestimativas das vazões pelo modelo (linha em cinza).

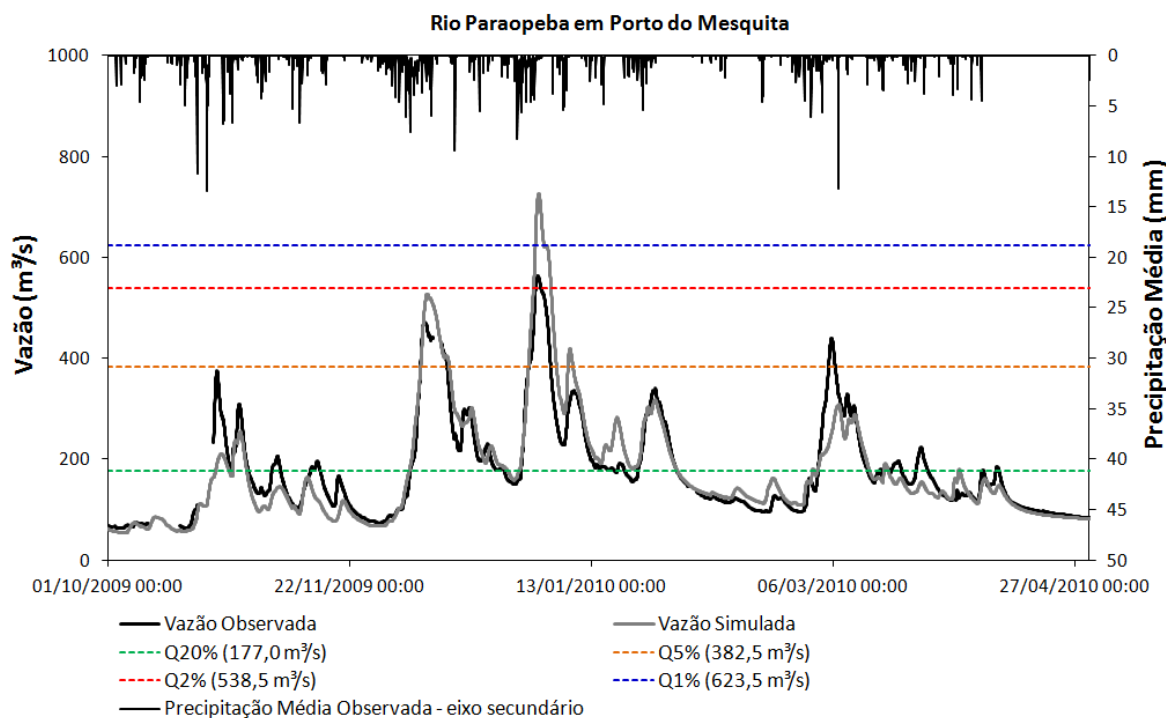
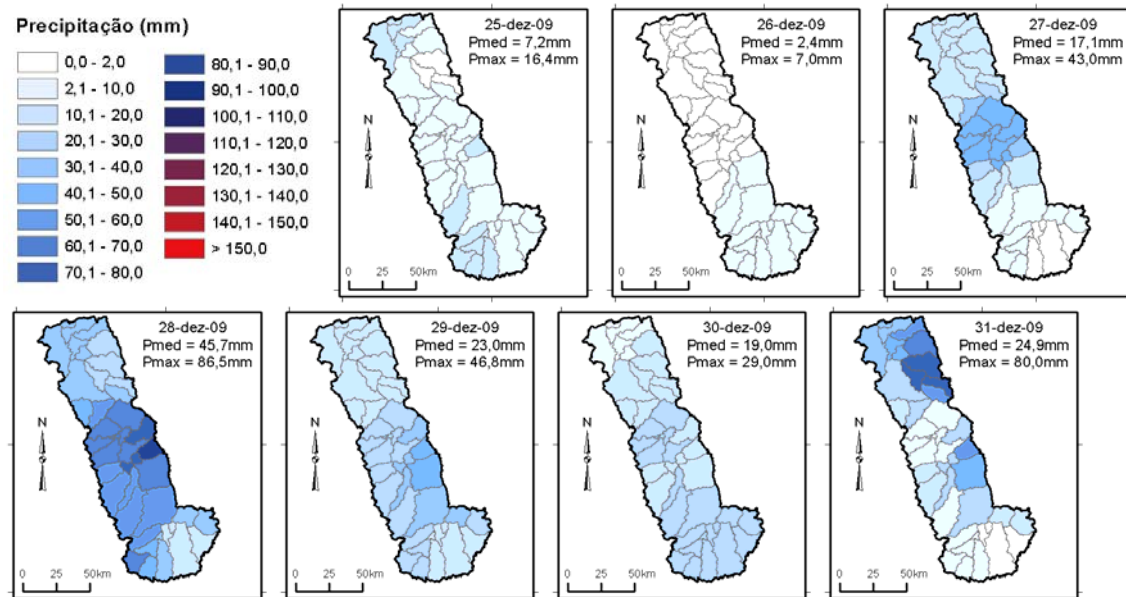


Figura 117. Vazões observadas e simuladas e precipitação média na bacia até Porto do Mesquita no período chuvoso (out-abr) do ano hidrológico 2009-2010.

O primeiro evento hidrológico com vazão superior a $177\text{m}^3/\text{s}$ (Q20%) nesse período ocorreu no dia 24/10/2009, quando a vazão de pico atingiu $370\text{m}^3/\text{s}$. Nos 20 dias posteriores, ocorreram sequências de eventos de menor magnitude, com vazões de pico da ordem de $200\text{m}^3/\text{s}$. A partir do dia 27/11/2009, as vazões aumentaram subitamente na estação Porto do Mesquita, atingindo $471,5\text{m}^3/\text{s}$ no dia 07/12/2009, o primeiro evento de cheias significativo nesse período chuvoso. Entre os dias 26/12/2009 e o dia 01/01/2010, as vazões no posto voltaram a aumentar, resultando no maior evento do ano hidrológico 2009-2010. Esse evento de cheia teve seu pico em 01/01/2010 09:00 UTC, quando a vazão atingiu $563,5\text{m}^3/\text{s}$, com tempo de retorno estimado em cerca de 1,1 anos. Nos sete dias que antecederam o pico do evento, a precipitação média acumulada sobre a bacia foi cerca de 140mm (Figura 118), sendo observados volumes diários superiores a 80mm no dia 28/12/2009, na porção central da bacia. No restante do período chuvoso, que se estendeu até o mês de abril, ocorreram eventos de menor magnitude, sendo o maior observado no início do mês de março, onde se registrou uma vazão de pico de $434\text{m}^3/\text{s}$ (TR~1ano). Dos três períodos chuvosos analisados, esse foi o que apresentou eventos de menor magnitude.



Pmed=precipitação média na bacia acumulada em um dia (01 - 00 UTC);
Pmax=precipitação máxima acumulada em um dia (01 - 00 UTC);
Precipitação média na bacia acumulada entre os dias 25 e 31/12/09= 139,4mm.

Figura 118. Precipitação observada na bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita no período entre 25/12/2009 e 31/12/2009.

a.3) Ano hidrológico 2010-2011

A partir da segunda quinzena do mês de outubro de 2010, foram observados os primeiros eventos de cheia na estação Porto do Mesquita. A Figura 119 apresenta os hidrogramas observados e calculados na simulação com o modelo hidrológico. No período que se estende entre novembro até próximo a segunda quinzena de dezembro, aparecem quatro eventos de cheia, com magnitudes próximas a $400\text{m}^3/\text{s}$ (TR~1 ano). A partir do dia 25/12/2010, as chuvas na bacia se intensificaram e as vazões na estação fluviométrica aumentaram continuamente, até atingir seu ápice em 01/01/2011 01:00 UTC, caracterizando o maior evento de cheia desse período chuvoso. A vazão de pico observada foi igual a $683,5\text{ m}^3/\text{s}$ (TR~1,45 anos). Nos sete dias que antecederam esse evento, a precipitação média total acumulada na bacia foi cerca de 150mm, tendo sido observados totais máximos diários de até 91mm na região norte da bacia no dia 27/12/2010 (Figura 120). No restante do período chuvoso ocorreram ainda dois eventos de cheia importantes, tendo o maior ocorrido durante o mês de março de 2011, com vazão de pico de $611\text{m}^3/\text{s}$ (TR~1,2 anos). Ao contrário dos outros períodos chuvosos analisados, nesse período observou-se uma tendência de subestimativa das vazões simuladas pelo modelo.

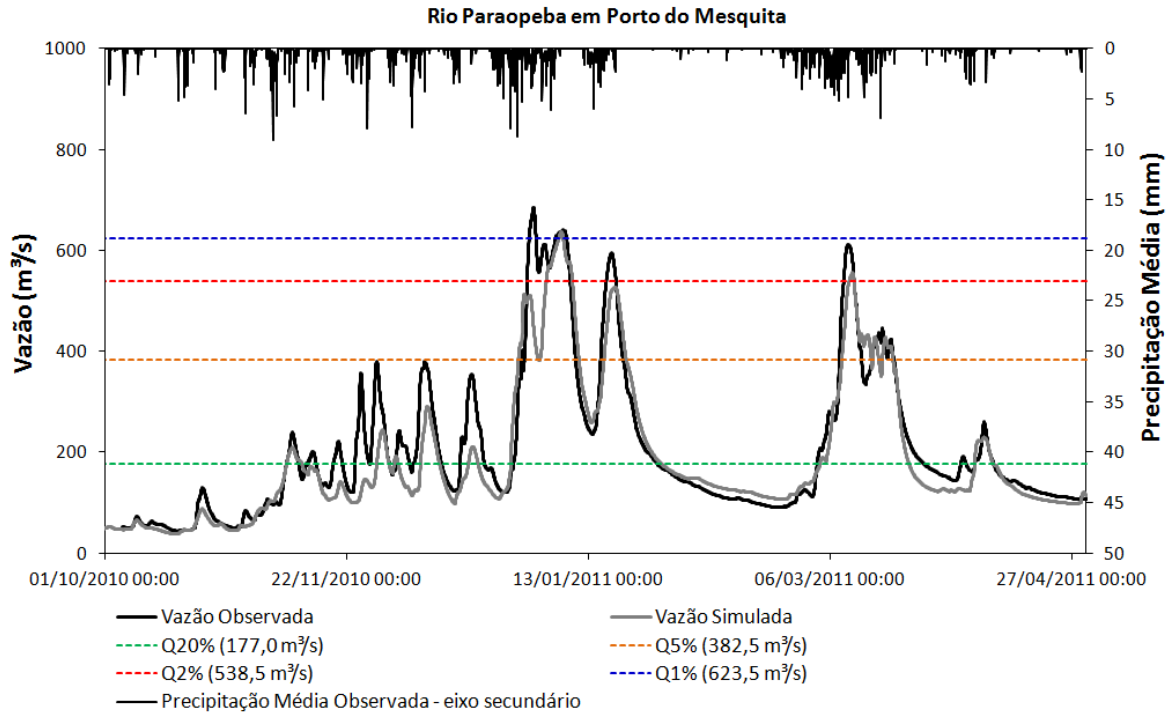
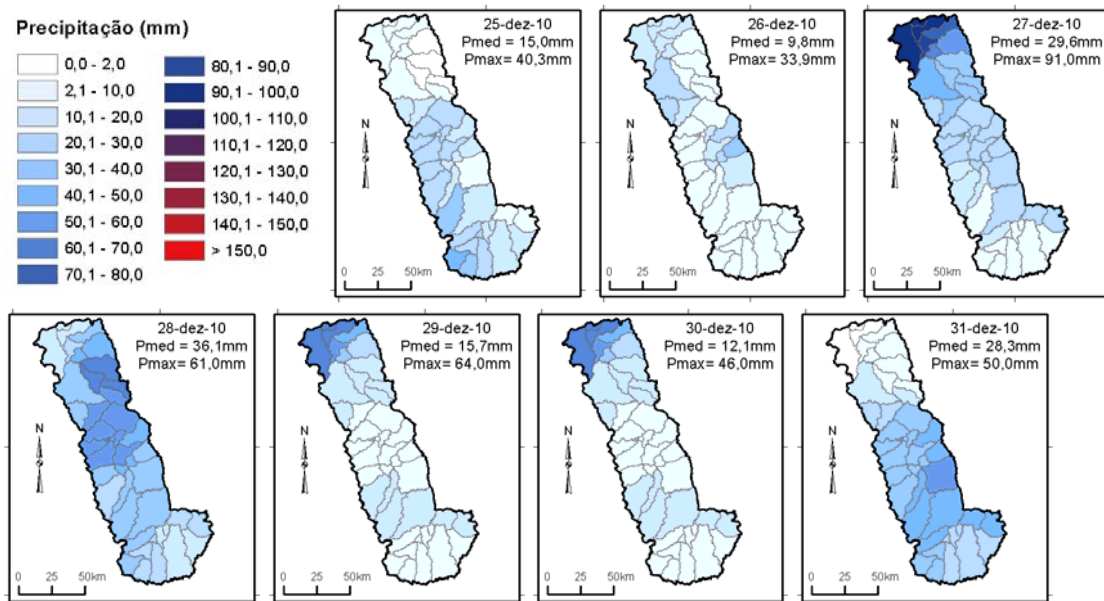


Figura 119. Vazões observadas e simuladas e precipitação média na bacia até Porto do Mesquita no período chuvoso (out-abr) do ano hidrológico 2010-2011.



Pmed=precipitação média na bacia acumulada em um dia (01 - 00 UTC);
 Pmax=precipitação máxima acumulada em um dia (01 - 00 UTC);
 Precipitação média na bacia acumulado entre os dias 25 e 31/12/10= 146,6mm.

Figura 120. Precipitação observada na bacia definida pela estação fluviométrica Porto do Mesquita no período entre 25/12/2010 e 31/12/2010.

Anexo 6

Tabela 25. Resultados de POD e POFD para as antecedências de 12h, 24h, 48h e 72h, para todas as vazões limites, para as previsões MSMES-H, a média do conjunto e o 1º, 5º e 9º decis do conjunto.

Previsão MSMES-H								
POFD					POD			
Vazão Limite (m³/s)	12h	24h	48h	72h	12h	24h	48h	72h
177,0	0,03	0,03	0,04	0,06	0,95	0,91	0,87	0,87
382,5	0,01	0,02	0,02	0,03	0,95	0,87	0,81	0,75
538,5	0,00	0,01	0,01	0,01	0,97	0,86	0,73	0,61
623,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,90	0,89	0,89	0,79
Média do Conjunto Hidrológico								
POFD					POD			
Vazão Limite (m³/s)	12h	24h	48h	72h	12h	24h	48h	72h
177,0	0,04	0,04	0,07	0,10	0,96	0,92	0,90	0,92
382,5	0,01	0,02	0,03	0,05	0,95	0,90	0,85	0,81
538,5	0,00	0,01	0,01	0,02	0,97	0,86	0,81	0,84
623,5	0,01	0,01	0,02	0,02	0,90	0,89	0,94	0,84
1º Decil do Conjunto Hidrológico								
POFD					POD			
Vazão Limite (m³/s)	12h	24h	48h	72h	12h	24h	48h	72h
177,0	0,02	0,02	0,03	0,03	0,95	0,90	0,85	0,82
382,5	0,01	0,02	0,02	0,02	0,94	0,85	0,78	0,68
538,5	0,00	0,01	0,01	0,01	0,97	0,78	0,73	0,50
623,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,90	0,89	0,89	0,68
5º Decil do Conjunto Hidrológico								
POFD					POD			
Vazão Limite (m³/s)	12h	24h	48h	72h	12h	24h	48h	72h
177,0	0,03	0,05	0,07	0,08	0,95	0,92	0,90	0,89
382,5	0,01	0,02	0,03	0,04	0,95	0,89	0,85	0,78
538,5	0,00	0,01	0,01	0,02	0,97	0,86	0,81	0,79
623,5	0,01	0,01	0,02	0,01	0,90	0,89	0,89	0,84
9º Decil do Conjunto Hidrológico								
POFD					POD			
Vazão Limite (m³/s)	12h	24h	48h	72h	12h	24h	48h	72h
177,0	0,06	0,08	0,13	0,18	0,96	0,94	0,94	0,96
382,5	0,01	0,03	0,05	0,09	0,95	0,91	0,94	0,92
538,5	0,00	0,01	0,03	0,05	0,97	0,95	0,97	0,95
623,5	0,01	0,02	0,03	0,05	0,90	0,94	0,94	0,95